



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

Influencia del método curado y el uso de árido reciclado en las propiedades del hormigón

Treball realitzat per:

Àlex Rebull Farré

Dirigit per:

Miren Etxeberria Larrañaga

Grau en:

Enginyeria de la Construcció

Barcelona, 15/06/2015

Departament de Materials

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que en cierta forma me han ayudado y me han servido como apoyo, tanto en la universidad como personalmente, para sacar adelante esta tesina.

Agradecer a mi tutora Dr. Miren Etxeberria por permitirme trabajar en este estudio y dotarme de todas las capacidades y conocimientos necesarios para poder avanzar en mi trabajo aprendiendo cada día algo nuevo.

También me gustaría agradecer a Andreu Gonzalez por ser mi compañero durante gran parte de la tesina y ayudarme en todo lo que fue necesario, aportando su experiencia y dando consejos muy útiles al realizar el trabajo.

A Oriol Tolosa, una persona que jamás imagine que acabaría trabajando conjuntamente en una tesina debido al distanciamiento con el paso del tiempo, gracias por el apoyo mutuo, por esos sábados de relevos a las 10 de la mañana y por todo el trabajo realizado.

Agradecer también la ayuda de los técnicos del laboratorio de materiales y estructuras por toda la ayuda prestada durante la realización de mi estudio.

Por último me gustaría agradecer a mi familia y a mi pareja toda la paciencia y apoyo que han volcado en mí, ayudándome a seguir hacia delante y sortear cualquier obstáculo que me encontrase en el camino. Rodeado de tan increíbles personas es difícil no conseguir las metas que uno desee.

Alex Rebull Farré

Título Influencia del método curado y el uso de árido reciclado en las propiedades del hormigón

Autor Alex Rebull Farré

Tutora Miren Etxeberria Larrañaga

Durante todos estos años, el número de infraestructuras ha ido en aumento generando una gran cantidad de residuos. Estos suelen acumularse en vertederos y plantas de reciclaje para un posterior tratamiento. Reciclar y reutilizar estos residuos procedentes del hormigón como árido reciclado permite, medioambientalmente, reducir el impacto generado y la posibilidad de reutilizar un material sobrante.

El objetivo de este estudio es hacer una comparativa entre el hormigón fabricado con áridos naturales (NAC) y el fabricado con áridos reciclados provenientes del hormigón (RAC). Durante todo este proceso se determinará la durabilidad, características físicas y mecánicas del hormigón.

Durante el estudio se definirán distintas variables, como la relación agua/cemento, el distinto tipo de curado y el tamaño del árido, analizando su influencia en las propiedades del hormigón. El objetivo del estudio es potenciar el uso de hormigón reciclado como hormigón estructural.

Los diferentes hormigones utilizados para realizar esta tesina son de 40MPa, 60MPa y 100MPa de resistencia característica original con una substitución del 100% del volumen del árido reciclado. Durante las primeras 24h se han empleado dos métodos de curado; curado normal y curado a vapor (SC). Con las variables expuestas anteriormente y con la fabricación de hormigones NAC y RAC compararemos los efectos beneficiosos o adversos a corto y largo plazo en cada uno de los hormigones.

Durante la fase experimental se siguió el método de Fuller para la dosificación del hormigón convencional y se determinó la relación agua/cemento para cada una de las fases de estudio. Las propiedades del hormigón se ensayaron mayoritariamente a la edad de 28 y 90 días. Las propiedades mecánicas fueron la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la tracción indirecta; las propiedades físicas como la densidad, absorción de agua y el volumen de poros accesibles. Por último, para la durabilidad se ensayó la velocidad del ultrasonido (UPV), la resistencia a penetración de los iones cloruros y la succión capilar.

Una vez analizados todos los resultados obtenidos, se puede concluir que con el curado normal obtenemos mejores resistencias a largo plazo, sin embargo, si queremos mejores propiedades mecánicas a corto plazo deberemos utilizar el curado a vapor en el hormigón. Los hormigones fabricados con árido de peor calidad (40 MPa), para hormigones que tengan una relación agua/cemento parecida a los hormigones estudiados durante la primera fase, obtendrán unas resistencias ligeramente inferiores con un curado normal respecto al hormigón de referencia, y similares al convencional si el proceso de curado es con vapor.

Índice

1	Introducción	17
1.1	Introducción.....	17
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	Objetivos generales.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
1.3	Metodología y organización	18
2	Estado del arte	21
2.1	Introducción.....	21
2.2	Definición árido reciclado	22
2.3	Tipologías de áridos reciclados	22
2.3.1	Árido reciclado de hormigón.....	22
2.3.2	Árido reciclado cerámico.....	23
2.3.3	Árido reciclado mixto	23
2.4	Diseño del hormigón con árido reciclado	23
2.5	Propiedades físicas del hormigón	24
2.5.1	Densidad.....	24
2.6	Propiedades mecánicas del hormigón reciclado	24
2.6.1	Resistencia a compresión del hormigón reciclado.....	24
2.6.2	Resistencia a tracción indirecta del hormigón reciclado.....	26
2.6.3	Módulo de elasticidad del hormigón reciclado	26
2.7	Durabilidad del hormigón reciclado	27
2.7.1	Propiedades físicas	27
2.7.2	Durabilidad-Procesos químicos.....	28
2.7.3	Durabilidad-Procesos físicos	29
2.8	Hormigón de alta resistencia con árido reciclado	30
2.8.1	Dosificación y materiales.....	31
2.8.2	Propiedades hormigón fresco	31
2.8.3	Propiedades mecánicas.....	31
2.8.4	Durabilidad del hormigón de altas prestaciones	33
2.9	Curado al vapor.....	33
2.9.1	Hormigón Convencional.....	35
2.9.2	Hormigón con áridos reciclados.....	37
3	Metodología y ensayos	39

3.1	Introducción.....	39
3.2	Caracterización de los Materiales.....	40
3.2.1	Cemento	40
3.2.2	Áridos	40
3.2.3	Aditivo	45
3.3	Proceso de fabricación del hormigón	45
3.3.1	Fabricación	45
3.3.2	Dosificación	46
3.3.3	Cono de Abrams	48
3.3.4	Probetas, densidad y compactación del hormigón fresco	48
3.3.5	Curado al vapor	49
3.3.6	Desmoldar y marcaje de las probetas	50
3.4	Ensayos del hormigón endurecido	50
3.4.1	Ensayos mecánicos.....	50
3.4.2	Ensayos físicos.....	51
3.4.3	Durabilidad	52
4	Resultados Fase experimental curado normal.....	55
4.1	Introducción.....	55
4.2	Ensayos del hormigón endurecido (NC), Propiedades mecánicas	55
4.2.1	Resistencia a compresión simple	55
4.2.2	Resistencia a tracción indirecta.....	61
4.2.3	Módulo de elasticidad	63
4.3	Ensayos físicos	64
4.3.1	Densidad, absorción y poros accesibles	64
4.4	Ensayos del hormigón endurecido (NC), Durabilidad	65
4.4.1	Succión capilar.....	65
4.4.2	UPV (Ultrasonic Pulse Velocity).....	68
4.4.3	Resistencia a la penetración de los iones cloruros.....	69
5	Resultados Fase experimental curado al vapor (SC)	73
5.1	Introducción.....	73
5.2	Ensayos del hormigón endurecido (SC), Propiedades mecánicas	73
5.2.1	Resistencia a compresión simple	73
5.2.2	Resistencia a tracción indirecta.....	78
5.2.3	Módulo de elasticidad	80
5.3	Ensayos físicos	81
5.3.1	Densidad, absorción y poros accesibles.....	81
5.4	Ensayos del hormigón endurecido (NC), Durabilidad.....	82

5.4.1	Succión capilar.....	82
5.4.2	UPV (Ultrasonic Pulse Velocity).....	85
5.4.3	Resistencia a la penetración de los iones cloruros.....	86
6	Comparación NC-SC	89
6.1	Introducción.....	89
6.2	Propiedades mecánicas	89
6.2.1	Resistencia a compresión.....	89
6.2.2	Resistencia a tracción indirecta.....	89
6.2.3	Módulo de elasticidad	90
6.3	Propiedades físicas	90
6.3.1	Densidad, absorción y poros accesibles	90
6.4	Durabilidad	90
6.4.1	Succión capilar.....	90
6.4.2	UPV (Ultrasonic Pulse Velocity).....	91
6.4.3	Resistencia a la penetración por iones cloruros	91
7	Conclusiones	93
7.1	Introducción.....	93
7.2	Conclusiones generales	93
7.3	Futuras líneas de investigación.....	94
8	Bibliografía	95

Índice de Figuras

Figura 1:1 Organización de la tesina	18
Figura 2:1 Composición de los residuos [2].	22
Figura 2:2 Evolución resistencia a compresión en 1 y 28 días [10].	25
Figura 2:3 Resistencia a compresión a 28 días para hormigón convencional y reciclado [12].	25
Figura 2:4 Estructura de la interfase [3].	26
Figura 2:5 Relación entre la resistencia a compresión y módulo de elasticidad dependiendo del tamaño del árido (10mm y 40mm) [13].	26
Figura 2:6 Evolución de la porosidad y la resistencia a compresión al paso del tiempo [18].	27
Figura 2:7 Ataque cloruros para cada tipología de hormigón [17].	28
Figura 2:8 Evolución retracción en el tiempo para distintas sustituciones de árido reciclado [19].	29
Figura 2:9 Evolución de la resistencia a compresión al paso del tiempo, para distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado [25].	32
Figura 2:10 Ciclo curado al vapor [28].	34
Figura 2:11 Evolución resistencias para un cierto periodo de retraso en el curado, a lo largo de un tiempo determinado [29].	35
Figura 2:12 Relación absorción de agua respecto el tiempo de retraso del curado [31].	36
Figura 3:1 Maquinaria utilizada para triturar y tamizar el árido.	41
Figura 3:2 Curva granulométrica de las distintas gravas.	42
Figura 3:3 Curva granulométrica de las arenas.	42
Figura 3:4 Curva granulométrica de las gravas obtenidas en la fase 3.	43
Figura 3:5 Curva granulométrica de las gravillas obtenidas en la fase 3.	43
Figura 3:6 Amasadora de eje vertical.	45
Figura 3:7 Curva teórica de Fuller – Curva Hormigón.	46
Figura 3:8 Molde cubico y cilíndrico.	48
Figura 3:9 Ciclo curado al vapor.	49
Figura 3:10 Cámara húmeda.	50
Figura 3:11 Prensa mecánica.	50
Figura 3:12 Ensayo UPV.	52
Figura 3:13 Ensayo succión capilar.	53
Figura 3:14 Ensayo penetración cloruros.	54
Figura 4:1 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.	56

Figura 4:2 Variación de la resistencia a compresión respecto al hormigón de referencia, para diferentes edades del hormigón.	57
Figura 4:3 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.	58
Figura 4:4 Variación de la resistencia a compresión respecto al hormigón de referencia, para diferentes edades del hormigón.	59
Figura 4:5 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.	60
Figura 4:6 Variación resistencia a tracción respecto al hormigón de referencia.....	62
Figura 4:7 Variación del módulo elasticidad respecto al hormigón de referencia.	63
Figura 4:8 Variación de la absorción respecto al hormigón de referencia.	65
Figura 4:9 Absorción capilar (mm), para 28 días.....	66
Figura 4:10 Absorción capilar (mm), para 28 días.....	67
Figura 4:11 Absorción capilar, para 28 días.	68
Figura 4:12 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para las edades de 28 y 90 días.	70
Figura 4:13 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para las edades de 28 y 90 días.	71
Figura 4:14 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para la edad de 28 días.	72
Figura 5:1 Variación de la resistencia a compresión respecto al hormigón de referencia, para diferentes edades del hormigón.	74
Figura 5:2 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.	75
Figura 5:3 Variación de la resistencia a compresión respecto al hormigón de referencia, para diferentes edades del hormigón.	76
Figura 5:4 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.	77
Figura 5:5 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.	78
Figura 5:6 Variación resistencia a tracción respecto al hormigón convencional de la fase 1.....	79
Figura 5:7 Variación del módulo elasticidad respecto al hormigón de referencia.	80
Figura 5:8 Variación de la absorción respecto al hormigón de referencia.	82
Figura 5:9 Absorción capilar, para 28 días.	83
Figura 5:10 Absorción capilar, para 28 días.	84
Figura 5:11 Absorción capilar, para 28 días.	85
Figura 5:12 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para las edades de 28 y 90 días.	86
Figura 5:13 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para las edades de 28 y 90 días.	87
Figura 5:14 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para la edad de 28 días.	88

Índice de Tablas

Tabla 2:1 Residuos generados en cada país [1].	21
Tabla 2:2 Cambios en los agregados a medida que aumenta la temperatura [23].	30
Tabla 2:3 Características físicas y mecánicas de los áridos naturales y reciclados [25].	31
Tabla 2:4 Resultados flexión, resistencia a tracción y módulo de diferentes tipos de hormigón [10].	33
Tabla 2:5 Resistencias obtenidas a lo largo de un tiempo determinado dependiendo de la tipología del hormigón, dependiendo del tipo de curado.	36
Tabla 2:6 Reacción a los ataques de cloruros para los diferentes tipos de hormigón [30].	37
Tabla 3:1 Composición química del cemento.	40
Tabla 3:2 Propiedades del CEM I 52.5 N.	40
Tabla 3:3 Densidad de la arena y grava natural.	44
Tabla 3:4 Densidad de las gravas recicladas.	44
Tabla 3:5 Nomenclatura hormigones.	47
Tabla 3:6 Dosificaciones campaña experimental.	47
Tabla 3:7 Docilidad del hormigón fresco, EHE-08.	48
Tabla 3:8 Rango de valores ASTM C1202, penetración de cloruros.	54
Tabla 4:1 Resistencia a compresión (NC), fase 1, 24 horas, 28 y 90 días.	55
Tabla 4:2 Resistencia a compresión (NC), fase 2, 24 horas, 28 y 90 días.	58
Tabla 4:3 Resistencia a compresión (NC), fase 3, 24 horas, 28 y 90 días.	60
Tabla 4:4 Resistencia a tracción indirecta (NC), fase 1, 2 y 3, 28 días.	61
Tabla 4:5 Módulo de elasticidad (GPa), fase 1, 2 y 3, 28 días (NC).	63
Tabla 4:6 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 1 (NC).	64
Tabla 4:7 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 2 (NC).	64
Tabla 4:8 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 3 (NC).	64
Tabla 4:9 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 1, edad de 28 días (NC).	65
Tabla 4:10 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 2, edad de 28 días (NC).	66
Tabla 4:11 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 3, edad de 28 días (NC).	67
Tabla 4:12 Rango de valores, velocidad UPV.	68
Tabla 4:13 Resultados UPV, fase 1,2 y 3, edad de 28 días (NC).	69
Tabla 4:14 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 1, 28 y 90 días (NC).	69
Tabla 4:15 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 2, 28 y 90 días (NC).	70
Tabla 4:16 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 3, 28 días (NC).	72
Tabla 5:1 Resistencia a compresión (SC), fase 1, 24 horas, 28 y 90 días.	73

Tabla 5:2 Resistencia a compresión (SC), fase 2, 24 horas, 28 y 90 días.	75
Tabla 5:3 Resistencia a compresión (SC), fase 3, 24 horas, 28 y 90 días.	77
Tabla 5:4 Resistencia a tracción indirecta (SC), fase 1, 2 y 3, 28 días.	78
Tabla 5:5 Módulo de elasticidad (GPa), fase 1, 2 y 3, 28 días (SC).....	80
Tabla 5:6 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 1 (SC).	81
Tabla 5:7 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 2 (SC).	81
Tabla 5:8 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 3 (SC).	81
Tabla 5:9 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 1, edad de 28 días (SC).....	82
Tabla 5:10 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 2, edad de 28 días (SC).....	83
Tabla 5:11 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 3, edad de 28 días (SC).....	84
Tabla 5:12 Resultados UPV, fase 1,2 y 3, edad de 28 días (SC).	85
Tabla 5:13 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 1, 28 y 90 días (SC). ...	86
Tabla 5:14 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 2, 28 y 90 días (SC). ...	87
Tabla 5:15 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 1, 28 días (SC).	88

Glosario

CDW Residuos generados de la construcción y demolición.

RAC Árido reciclado de hormigón

a/c Relación agua/cemento

NAC Hormigón convencional

ITZ Zona de transición, interfase

HPC Hormigón de alta resistencia

NC Curado normal

SC Curado al vapor

UPV Ultrasonic Pulse Velocity

A(RAC-NAC)B-C A:Fase de estudio, tipo de hormigón (convencional o curado), B: Resistencia del hormigón, C: Tipo de curado

1 Introducción

1.1 Introducción

La construcción y los residuos producidos por las demoliciones han ido en aumento a medida que han pasado los años. Considerando el gran impacto ambiental generado por la utilización de recursos naturales limitados para la fabricación de hormigón es necesario reciclar y reutilizar todo este material sobrante que ocupa grandes espacios en vertederos.

Siendo el material más utilizado en la construcción, es lógico que la mayor parte de los residuos generados sean hormigón. Al año se producen aproximadamente unos 450 millones de toneladas de residuos solamente en Europa, esto supone un gran problema de almacenaje para tan grande cantidad de material sobrante.

Reciclar este hormigón es vital para reducir la gran cantidad de espacio necesario para almacenar el material residual y disminuir la necesidad de utilizar recursos naturales limitados ya que un 80% de estos residuos acaba almacenado en vertederos.

En diversos países como Estados Unidos, Alemania y Holanda, están introduciendo medidas legislativas para promover el uso de hormigón reciclado en las industrias de la construcción. Los estudios realizados sobre el uso del hormigón reciclado como hormigón estructural permiten obtener las ventajas y desventajas de su uso, intentando impulsar la reutilización de este material en la obra.

Hasta hace poco, el uso de hormigón reciclado estaba destinado solamente a hormigones con poca responsabilidad estructural, debido a la poca información y malos resultados obtenidos en las investigaciones. Poco a poco, se van obteniendo nuevos datos que permitirán potenciar el uso del hormigón reciclado para hormigones con altas prestaciones.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

El objetivo principal de esta tesina es validar la utilización del árido reciclado para la fabricación de un hormigón, utilizando 3 tipologías diferentes de árido, respecto a un hormigón fabricado con áridos naturales. Se pretende que este cumpla las propiedades mecánicas y de durabilidad para su uso como hormigón estructural.

Se han diseñado 3 fases distintas con diferentes variables durante el estudio para poder hacer una comparativa de los resultados obtenidos durante la fase experimental y determinar el comportamiento de cada tipo de hormigón respecto las propiedades ensayadas durante el estudio.

1.2.2 Objetivos específicos

Para poder obtener los objetivos generales de nuestro estudio, se plantean una serie de objetivos específicos para determinar el comportamiento de nuestro hormigón reciclado de altas prestaciones.

Los objetivos específicos son:

- Validar la calidad del árido reciclado utilizado en el estudio procedente de la trituración de hormigón residual.
- Utilizar 2 tipos de curado para determinar el comportamiento del hormigón en cada situación: Curado en cámara de vapor y curado en cámara húmeda.
- Comparar el comportamiento del hormigón convencional respecto el hormigón reciclado en los ensayos físicos, durabilidad y mecánicos.

1.3 Metodología y organización

En el siguiente apartado, se muestra de forma esquemática en la *figura 1.1* la organización del estudio y se explica cada uno de sus apartados.

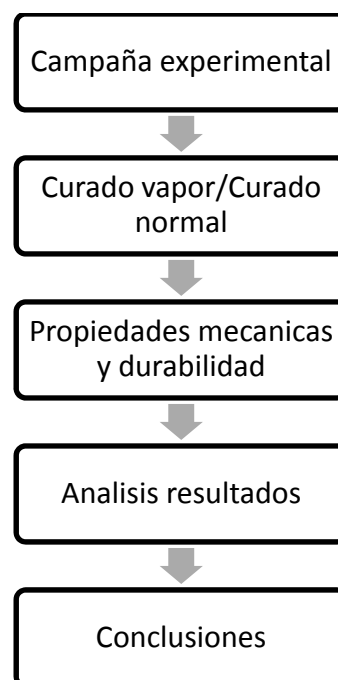


Figura 1:1 Organización de la tesina

El documento se ha organizado en una serie de capítulos que recogen el contenido estudiado en la tesis. El presente documento está formado por una serie de apartados:

En el **Capítulo 1** se describen las necesidades de desarrollar el trabajo. Se identifican los objetivos necesarios para dar una respuesta al estudio realizado.

En el **Capítulo 2** se revisa el estado del arte para el caso del hormigón reciclado. Se presentan las propiedades obtenidas mediante los estudios de otros autores y se divide en diferentes apartados, dependiendo del tipo de curado, hormigón utilizado y las propiedades obtenidas.

En el **Capítulo 3** se determinan los materiales utilizados durante la fase experimental, la planificación y la campaña experimental realizada durante el estudio. Se describen los ensayos utilizados para la obtención de las propiedades del hormigón, el tipo de probetas utilizadas y las dosificaciones en cada una de las fases del estudio.

En el **Capítulo 4** se muestran y analizan los resultados obtenidos para el hormigón con un curado normal.

En el **Capítulo 5** se muestran y analizan los resultados obtenidos para el hormigón con un curado al vapor.

En el **Capítulo 6** se comparan los resultados obtenidos con curado normal y curado al vapor, para caracterizar el hormigón en función de estas variables.

Finalmente, en el **Capítulo 7**, se muestran las conclusiones obtenidas a través de la fase experimental y se plantea dar respuesta a los objetivos planteados al inicio del documento.

2 Estado del arte

2.1 Introducción

Debido a que en los últimos años el crecimiento y el desarrollo de la sociedad ha ido en aumento, la actividad en la construcción creció considerablemente produciendo una gran cantidad de residuos procedentes de la construcción y demolición (CDW). Este aumento de residuos provoca un gran problema medioambiental debido a que un 75% se envía a vertederos y no tiene un uso determinado.

Una manera de eliminar estos residuos y disminuir la cantidad de recursos naturales limitados utilizados en la fabricación del hormigón es reutilizando y reciclando estos hormigones obtenidos a partir de los residuos. Muchos países como Alemania y Francia están empezando a reciclar el hormigón obtenido de los residuos, aunque solo un 28% de estos residuos son reutilizados y el resto son destinados a vertederos o incinerados.

En la siguiente figura [1] podemos observar la cantidad de CDW generado por cada país y el porcentaje que es reutilizado:

Tabla 2:1 Residuos generados en cada país [1].

Member state	CDW in million ton	% Reused or recycled	% Landfilled or incinerated
Germany	59	17	83
United Kingdom	30	45	55
France	24	15	85
Italy	20	9	91
Spain	13	<5	>95
Netherlands	11	90	10
Belgium	7	87	13
Austria	5	41	59
Portugal	3	<5	>95
Denmark	3	81	19
Greece	2	<5	>95
Sweden	2	21	79
Finland	1	45	55
Luxembourg	1	<5	>95
EU-15	0	-	-
	180	28	72

Podemos observar que Alemania es, dentro de la Unión Europea, la que genera mayor cantidad de CDW y sin embargo solo recicla un 17% del total de residuos. En cambio, países como Bélgica o Dinamarca están reciclando más del 80% de los residuos obtenidos. Los estudios realizados en la actualidad se centran en la obtención de un hormigón con áridos reciclados que cumpla la normativa vigente, estudiando las ventajas e inconvenientes de este tipo de hormigón.

Para mitigar estos efectos negativos producidos por la gran cantidad de residuos generados tenemos que intentar que la industria de la construcción sea económicamente y ambientalmente sostenible.

2.2 Definición árido reciclado

Definimos el árido reciclado como el material obtenido después de procesar los residuos provenientes de la construcción.

Estos residuos son generados durante el proceso de construcción o de demolición. La estructura de este material puede ser muy simple o muy compleja, ya que depende mucho de la procedencia de estos residuos. En la *figura 2.1* [2] podemos observar la diferente mezcla de componentes obtenidos:

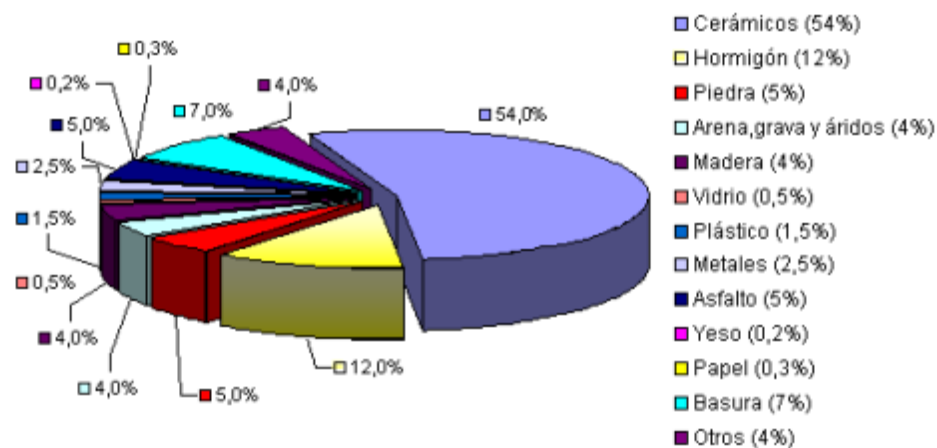


Figura 2:1 Composición de los residuos [2].

Los materiales que suelen abundar más suelen ser el cerámico y el hormigón. El resto depende mucho de la procedencia del residuo y del tipo de obra demolida.

2.3 Tipologías de áridos reciclados

Dependiendo de su procedencia de origen diferenciaremos entre árido reciclado de hormigón, cerámico o mixto.

2.3.1 Árido reciclado de hormigón

El hormigón obtenido a través de los residuos almacenados en vertederos, una vez machucado y tamizado, conseguimos el árido reciclado. Este árido proviene únicamente del hormigón, compuesto por cemento, agua, áridos, adiciones y aditivos), y características tales como la fluencia y retracción dependerán mucho de la cantidad de mortero adherido al árido reciclado.

2.3.2 Árido reciclado cerámico

Proviene de residuos donde la procedencia de materiales cerámicos tiene que ser predominante. La densidad seca tiene que ser superior a 1600 kg/m^3 en el 85% del árido ya que es un material muy ligero y poroso.

2.3.3 Árido reciclado mixto

Este tipo de árido debe de contener un 50% o más de hormigón con una densidad seca de 2100 kg/m^3 y el resto de materiales, en caso del material cerámico, debe de cumplir lo especificado en el caso de árido reciclado cerámico respecto a su densidad seca.

2.4 Diseño del hormigón con árido reciclado

El hormigón reciclado puede ser tratado como un hormigón convencional, es decir, se puede dosificar, mezclar, transportar, colocar, compactar y curar de la misma forma según Etxeberria et. al [3]. Los áridos reciclados tienen una capacidad de absorción elevada por lo que es recomendable humedecerlos para reducir su absorción y poder controlar la relación agua/cemento efectiva.

Para obtener una buena dosificación tenemos que tener en cuenta ciertos parámetros [3][4]:

- Determinar la capacidad de absorción de los áridos reciclados y humedecerlos para que lleguen a un 80% de su absorción, asegurando una relación agua/cemento efectiva constante y una buena trabajabilidad del hormigón.
- Para obtener una resistencia parecida al hormigón convencional, debería ajustarse la relación agua/cemento del hormigón con áridos reciclados.
- Para definir el mismo volumen del árido reciclado sustituyendo al natural, deberá conocerse la densidad de cada uno de ellos.
- Si queremos obtener una buena unión entre la pasta de cemento y el árido, debemos completar la mezcla en 2 fases [3]; se añaden los áridos finos y gruesos y se mezclan en la amasadora durante 1 minuto, luego se añade el cemento junto con la mitad del agua y se mezcla durante 1 minuto más. Por último se deja 90 segundos mezclando y se acaba de verter el agua restante.
- Hay que valorar la cantidad de agua necesaria para obtener la relación agua/cemento que buscamos.

Debido a que los áridos reciclados tienen una elevada capacidad de absorción, es recomendable saturarlos hasta un 80% de su capacidad máxima de absorción evitando que estos, durante el proceso de amasado, absorban el agua de la pasta y causen una baja trabajabilidad.

Debido a que los áridos reciclados necesitan una demanda mayor de agua (5-10%), el contenido de cemento deberá ser superior en comparación con un hormigón convencional, si queremos que estos obtengan unas resistencias similares.

2.5 Propiedades físicas del hormigón

En este apartado se analizará en particular la densidad del hormigón convencional y del reciclado, otras propiedades tales como la permeabilidad se estudiarán en otro apartado.

2.5.1 Densidad

El hormigón reciclado tiene una densidad entre un 5-15% menor respecto a un hormigón convencional [5]. Según las investigaciones realizadas, un hormigón convencional tiene una densidad media de 2400 kg/m^3 y uno reciclado 2250 kg/m^3 [6].

2.6 Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Las propiedades mecánicas del hormigón dependerán mucho de la zona de transición de mortero y árido, ya que esta zona influenciará a la adherencia y modificará las propiedades de nuestro hormigón.

2.6.1 Resistencia a compresión del hormigón reciclado

La zona de transición entre el mortero y el árido (ITZ) desempeña un papel muy importante en la resistencia del hormigón. Incluso para hormigones de alta resistencia, la ITZ es un punto de baja resistencia debido a la elevada porosidad en la zona [7]. El efecto producido por el árido reciclado fue estudiado por Butler et al [8] analizando el plano de rotura que se producía en el hormigón. Se observó que los planos de fallo se formaban alrededor del árido indicando que la zona que limita la resistencia al hormigón es la ITZ.

Con hormigones reciclados con resistencia a compresión menor respecto a los convencionales, Liu et al [9] define, que la superficie rugosa y la forma irregular de los áridos reciclados provocan una concentración de tensiones que inducen a una fisuración a través de la superficie de los áridos originales.

Según los estudios de Etxeberria et al [10], la mayoría de los hormigones con árido reciclado obtuvieron mayores resistencias a compresión en las primeras 24 horas en comparación con el convencional. Una de las razones a las que se debe esta baja resistencia a compresión en el hormigón convencional es la diferencia del % de humedad en los áridos naturales respecto a los reciclados.

Mayor cantidad de agua fue añadida en el hormigón convencional alterando su resistencia a compresión en las primeras 24 horas. En cambio, el reciclado al no estar saturado del todo, disminuye la relación agua/cemento en la ITZ aumentando su resistencia. En la *figura 2.2*, podemos ver las resistencias de los diferentes hormigones a 1 y 28 días:

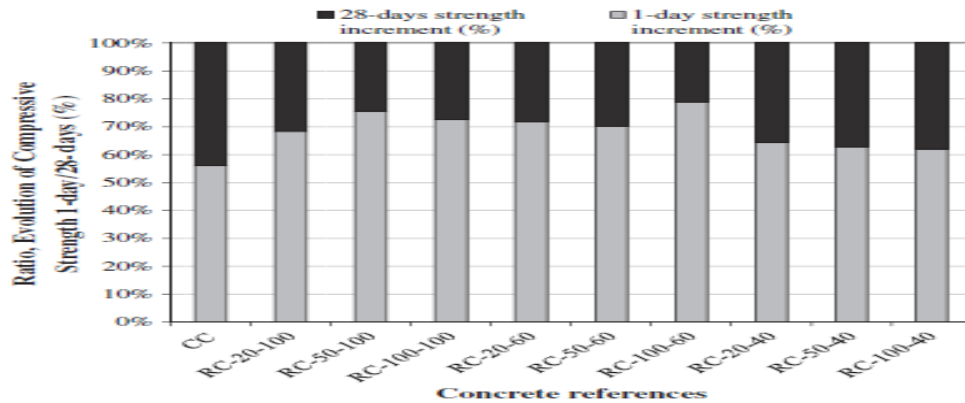


Figura 2:2 Evolución resistencia a compresión en 1 y 28 días [10].

Hoffman et al [11] determino en sus estudios que la superficie rugosa de los áridos reciclados permitía una buena unión entre los agregados y la pasta de cemento. Debido a esta rugosidad y a la capacidad de absorción del mortero adherido originalmente, la adherencia proporcionada es mejor entre la pasta de cemento y los áridos reciclados, y la existencia de la interfase entre la nueva pasta y la antigua no se aprecia.

Los estudios realizados por D. Pedro, J. Brito, L. Evangelista [12] demostraron que utilizando áridos reciclados de 20, 45 y 65 MPa, las pérdidas de resistencia a compresión eran similares para la edad de 1, 28 y 56 días. El hormigón de 20 MPa sufría unas pérdidas de resistencia alrededor del 14% y el resto de tipologías sufrían aproximadamente un 5%. Estas pérdidas son producidas por el mortero adherido a la superficie del hormigón convencional sin haber añadido el árido reciclado, provocando un incremento de la absorción de los agregados y disminuyendo la densidad de sus partículas. En la *figura 2.3* podemos observar las diferentes resistencias obtenidas en el estudio con el hormigón convencional y las distintas tipologías de árido reciclado:

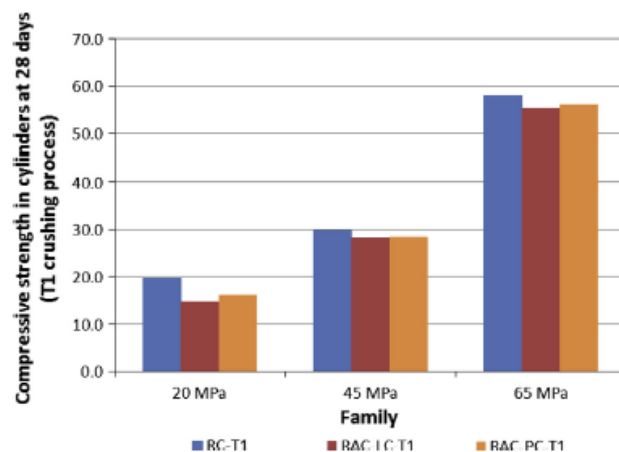


Figura 2:3 Resistencia a compresión a 28 días para hormigón convencional y reciclado [12].

2.6.2 Resistencia a tracción indirecta del hormigón reciclado

Los hormigones reciclados tienen un aumento de la resistencia a tracción respecto a un hormigón convencional debido a la capacidad de absorción del mortero adherido y que se encuentra en el árido reciclado, aumentando la eficacia de la nueva ITZ. Según Etxeberria et al [3], esto solo ocurre en hormigones donde la substitución del árido reciclado no llega al 100% del total.

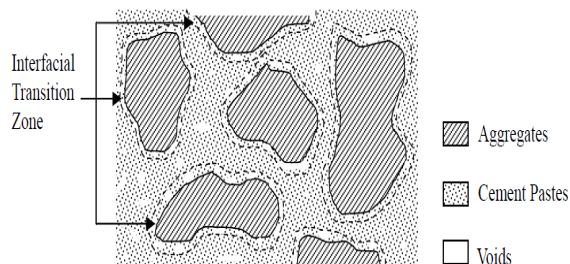


Figura 2:4 Estructura de la interfase [3].

Ensayando el modelo de rotura, según los estudios de Liu et al [9], la mayoría de fisuras observadas aparecen alrededor del árido reciclado. Los planos de rotura se sitúan entre el nuevo mortero y el original, rodeando las ITZ. Sin embargo, apenas se encontraron fisuras que cruzaban el ITZ, indicando que la unión entre el mortero adherido en el hormigón reciclado y el nuevo era bastante buena.

2.6.3 Módulo de elasticidad del hormigón reciclado

Según los estudios de Padminí et al [13], para una resistencia del hormigón determinada, el módulo de elasticidad en un hormigón reciclado es menor comparándolo con un convencional. Un mayor porcentaje de reducción del módulo de elasticidad se produjo en los hormigones con áridos de menor tamaño. Cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado, mayor es la reducción de su módulo elástico. En la figura 2.5 podemos observar la variación del módulo para diferentes tipologías de hormigón:

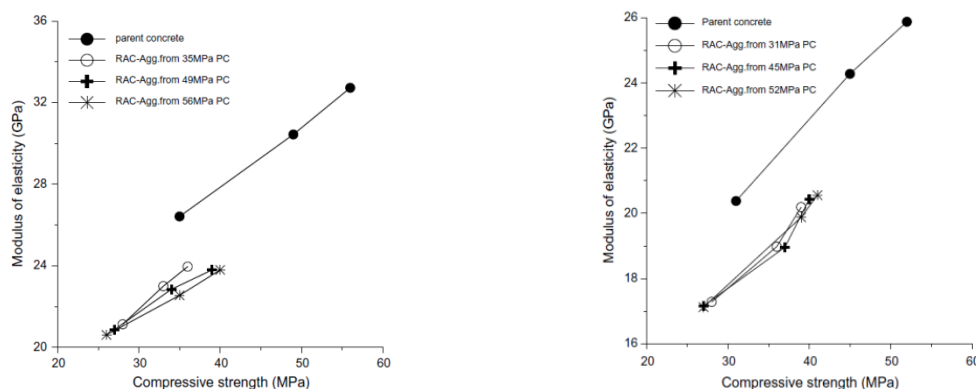


Figura 2:5 Relación entre la resistencia a compresión y módulo de elasticidad dependiendo del tamaño del árido (10mm y 40mm) [13].

Según Etxeberria et al [3], debido a que el árido reciclado tiene más facilidad a deformarse que el natural, el módulo de elasticidad va disminuyendo a medida que aumentamos la cantidad de árido reciclado ya que el módulo del hormigón depende del módulo de los áridos utilizados.

2.7 Durabilidad del hormigón reciclado

En el siguiente apartado se estudiara la durabilidad del hormigón reciclado estudiando su comportamiento respecto a procesos de deterioro.

2.7.1 Propiedades físicas

Permeabilidad

La permeabilidad se ve muy influenciada dependiendo de la cantidad de árido reciclado substituido en el hormigón reciclado. A mayor cantidad, la permeabilidad aumentara, pero con el paso del tiempo y la duración del curado esta se verá reducida.

Según Kwan et al [14], si ampliábamos el tiempo de curado para un hormigón convencional y uno reciclado, la permeabilidad se reducía en un 7,4% y un 16,3% respectivamente. Esta reducción de permeabilidad es debida al proceso de hidratación del cemento, donde observamos que en los dos hormigones se produce una disminución de la permeabilidad al paso del tiempo.

Porosidad

La porosidad en los hormigones es medida a través del método de intrusión de mercurio. Las probetas han sido ensayadas a los 1, 28 y 90 días y mediante el ensayo MIP se mide el radio teórico del poro (el proceso incluye ciclos de intrusión y extrusión, junto con la presión ejercida frente al volumen introducido de mercurio).

Kou et al [18] demostraron que hay una relación entre la porosidad y las propiedades mecánicas del hormigón. La tracción indirecta y la resistencia a compresión aumentaban, mientras que la porosidad disminuía en todos los hormigones con edad desde los 28 días hasta los 5 años.

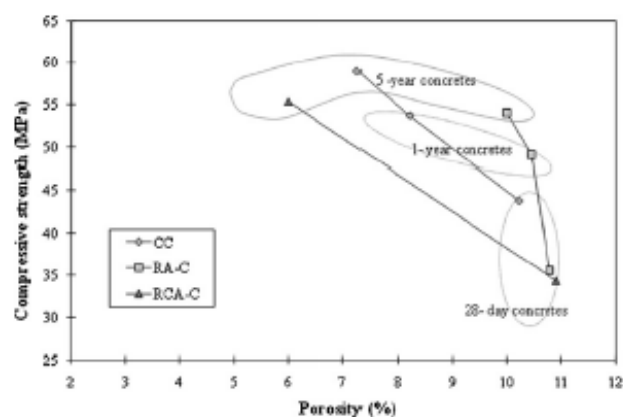


Figura 2:6 Evolución de la porosidad y la resistencia a compresión al paso del tiempo [18].

En esta figura se puede observar como la resistencia a compresión va aumentando a medida que pasa el tiempo y como su porosidad disminuye.

2.7.2 Durabilidad-Procesos químicos

Carbonatación

Según los estudios de Dhir et al [15], debido a que los hormigones reciclados tienen una permeabilidad mayor comparado con los convencionales, las investigaciones normalmente muestran que la carbonatación se produce de forma más rápida en los RAC. Pero, estudios realizados para hormigones RAC y NAC de igual resistencia, han demostrado que la profundidad de la carbonatación se reduce ya que el contenido de cemento en los áridos reciclados aumenta, por lo tanto los RAC resisten mejor a carbonatación que los NAC [16].

Esto es debido a que los RAC para llegar a una cierta resistencia necesitan mayor cantidad de cemento y la reserva alcalina adicional actúa protegiendo la superficie de los mecanismos de la carbonatación. A parte, los áridos reciclados están constituidos por mortero antiguo que ayuda a aumentar las reservas alcalinas aún más.

Ataque por Cloruros

Según Dhir et al [15], la resistencia del hormigón a los ataques por cloruros se ve afectada a medida que aumenta la cantidad de áridos reciclados utilizados en el hormigón. Está demostrado que la reducción de la relación agua/cemento efectiva produce un hormigón más impermeable y la resistencia a la penetración de cloruros aumenta respectivamente. A medida que pasa el tiempo (28-90 días), tal como dice Leng [17], el incremento de volumen debido al efecto de la hidratación y la formación de zonas impermeables permite aumentar las defensas del hormigón contra estos ataques.

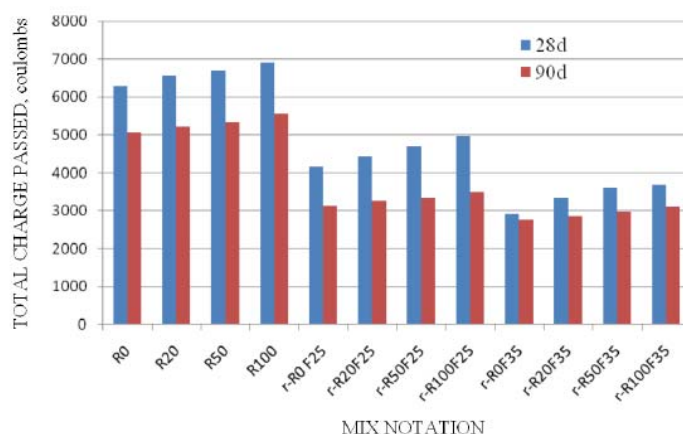


Figura 2:7 Ataque cloruros para cada tipología de hormigón [17].

En la *figura 2.7*, podemos observar como a medida que disminuye la cantidad de árido reciclado utilizado, la resistencia a los ataques por cloruros aumenta. Otro factor importante es el tiempo, ya que a los 90 días el hormigón es más resistente que uno a 28 días.

2.7.3 Durabilidad-Procesos físicos

Fluencia y retracción por secado

La fluencia puede ser definida como la pérdida de agua en la pasta de cemento debido a la aplicación de cargas. Hormigones con un alto contenido de áridos reciclados, las tensiones obtenidas son más bajas ya que son causadas por la fluencia. Según Domingo et al [19], la deformación obtenida por fluencia en el hormigón reciclado era mayor respecto al convencional, a mayor cantidad de árido reciclado substituido (20% substitución obtuvo un 35% superior que el convencional y con un 100% de substitución la fluencia incrementaba un 51% respecto el convencional).

En el hormigón reciclado la retracción aumenta pasados los 28 días. Hormigones con bajo porcentaje de substitución presentaban una retracción parecida al convencional para cortas edades, pero a la larga acababan diferenciándose.

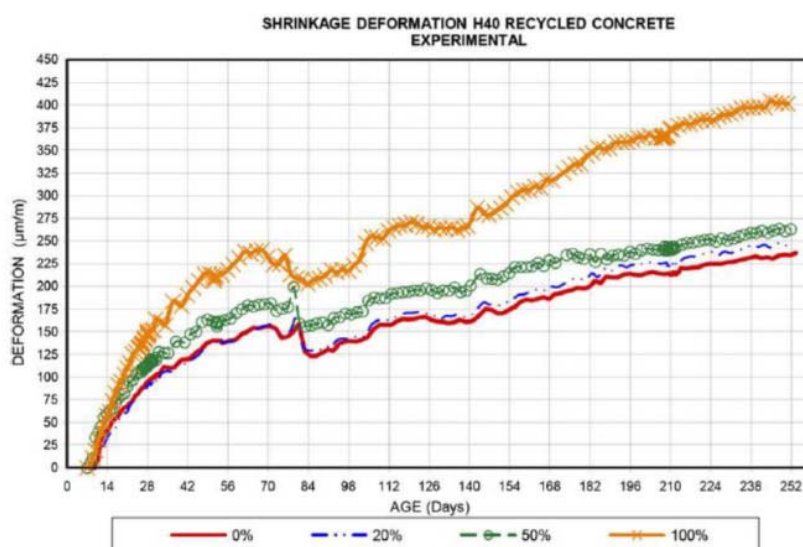


Figura 2:8 Evolución retracción en el tiempo para distintas sustituciones de árido reciclado [19].

A medida que se aumenta el % de árido substituido, la retracción aumenta respecto el convencional. En la figura podemos observar el fenómeno.

Resistencia a los ciclos hielo-deshielo

Investigadores han demostrado que un hormigón con áridos reciclados con aire ocluido puede resistir los ciclos de hielo-deshielo [20]. No obstante, para un RAC sin aire ocluido tendrá mayor facilidad a sufrir bajo los efectos de las heladas y tendrá una mayor degradación respecto un hormigón convencional [21].

Se demostró que el mortero adherido que se encuentra en la superficie del árido reciclado, no produce ningún efecto adverso en los ciclos hielo-deshielo. Una de las causas que afecta a los RAC es la estructura del poro de la pasta de cemento endurecido previamente,

adhiriéndose a la superficie de los áridos reciclados, ya que la matriz de los poros absorbía el agua durante la mezcla, incrementando la relación agua/cemento en la pasta [22]

Resistencia a las altas temperaturas

En general, las altas temperaturas afectan gravemente a las propiedades mecánicas y a la durabilidad del hormigón convencional y reciclado. Según Cree et al [23], a partir de los 300 °C, el hormigón empieza a verse afectado (reducción de la resistencia entre un 15-40%), en caso de no llegar a esta temperatura límite, el hormigón pierde poca resistencia y con una rehidratación se resolvería el problema.

Dependiendo de las temperaturas a las que llegue a estar el hormigón, el cemento portland se verá afectado de diferentes maneras tal como describe en la *figura 2.9*.

Tabla 2:2 Cambios en los agregados a medida que aumenta la temperatura [23].

Changes in natural aggregates as temperature increases.

Temperature	Changes associated with aggregate
<100 °C [20]	Free water evaporates in aggregates
300–500 °C [5,28]	Common aggregates remain stable
570 °C [5,23]	Quartz expands by approximately 5.7% in volume
600–800 °C [29]	Carbonate aggregate undergo a de-carbonation reaction
800–1200 °C [29]	Carbonate aggregate complete disintegration
600–900 °C [23]	Limestone decomposes
1100–1200 °C [23]	Concrete melts

Si exponemos el hormigón a elevadas temperaturas, la evolución de las distintas muestras es similar, haciendo imposible encontrar diferencias apreciables en los gradientes de temperatura en la interfase en la matriz del hormigón. Las temperaturas alcanzadas con un hormigón convencional y un reciclado son similares, exceptuando algún caso de RAC con árido cuartico (mayor conductividad térmica).

2.8 Hormigón de alta resistencia con árido reciclado

Este tipo de hormigón (HPC) puede tener una trabajabilidad, una resistencia mayor frente a los agentes agresivos y unas mejores propiedades mecánicas respecto a uno convencional. El uso de áridos reciclados puede conllevar a que aparezcan ciertos aspectos negativos, pero es necesario su uso, ya que aparte de aportar otras propiedades al hormigón, ayuda medioambientalmente a reducir el impacto de los residuos generados por la obra.

La finalidad del estudio de Ajdukiewicz et al [24] era utilizar áridos procedentes de estructuras con un máximo de 7 años de periodo de vida, y fabricar hormigón de altas prestaciones. Debido a que el mortero adherido al árido reciclado mantenía alguna de sus propiedades si la zona carbonatada no era muy profunda, esta actividad podía ser activada haciendo uso de adiciones reduciendo la cantidad de cemento a utilizar en la mezcla.

2.8.1 Dosificación y materiales

Para el diseño y dosificación del RAC no encontramos muchas diferencias respecto al NAC. Tenemos que tener en cuenta que hay que aplicar correcciones a la relación agua/cemento para obtener una trabajabilidad adecuada, sin afectar del todo a las resistencias obtenidas por el hormigón.

Según Limbachiya [25], tenía en cuenta los efectos producidos por los áridos reciclados en el hormigón para así ajustar a posteriori la relación agua/cemento de la dosificación. Para este tipo de hormigón, la relación a/c ronda entre un 0,29-0,45, pero se utiliza siempre la misma relación para cada grupo que vaya a estudiarse. Los áridos reciclados tienen una densidad relativa menor (7-9%) y unas 2 veces mayor absorción de agua respecto a un árido natural. En la *figura 2.1*, se muestra los áridos utilizados en el estudio de Limbachiya:

Tabla 2:3 Características físicas y mecánicas de los áridos naturales y reciclados [25].

Table 1 – Physical and mechanical characteristics of RCA and NA					
Property	Coarse aggregate				Natural sand
	RCA		Natural Gravel		
	20-10 mm	10-5 mm	20-10 mm	10-5 mm	
Physical characteristics					
Relative density (SSD), kg/m ³	2410	2400	2600	2600	2540
Loose bulk density (OD), kg/m ³	1210	1170	1360	1360	1460
Water absorption, %	4.9	5.2	2.5	2.5	1.7
Attached cement paste, % (m/m)	9.3	11.5	-	-	-

Para su estudio eligió elementos prefabricados de hormigón estructural debido a que existe una gran disponibilidad de este material y posee unas buenas características mecánicas para poder utilizarlo en la fabricación de hormigón de alta resistencia.

2.8.2 Propiedades hormigón fresco

Para este tipo de hormigón, es necesario modificar la relación agua/cemento para obtener la trabajabilidad necesaria sin alterar demasiado las resistencias que queremos obtener. Si queremos resistencias altas, la relación a/c tiene que disminuir, de forma que obtendremos normalmente hormigones con una trabajabilidad seca o plástica.

2.8.3 Propiedades mecánicas

Resistencia a compresión

Según los estudios de Limbachiya [25], se demostró que si se substituía el árido natural por reciclado, para elevados % de substitución, la resistencia a compresión del hormigón de altas prestaciones mejoraba. En este estudio se comparó el hormigón convencional respecto hormigones con diferentes % de substitución y se llegó a la conclusión que para elevados % de

substitución se podía llegar a obtener las misma resistencia a compresión que un NAC o incluso mejor. Los factores que fueron variando en el estudio para intentar obtener la resistencia deseada fue la relación agua/cemento, variando la cantidad de agua, cemento o los dos. El problema de modificar estos valores, en los hormigones con una sustitución mayor al 50%, si reducíamos el contenido de agua para obtener las resistencias deseadas, era muy difícil llegar a tener las propiedades deseadas en el hormigón fresco.

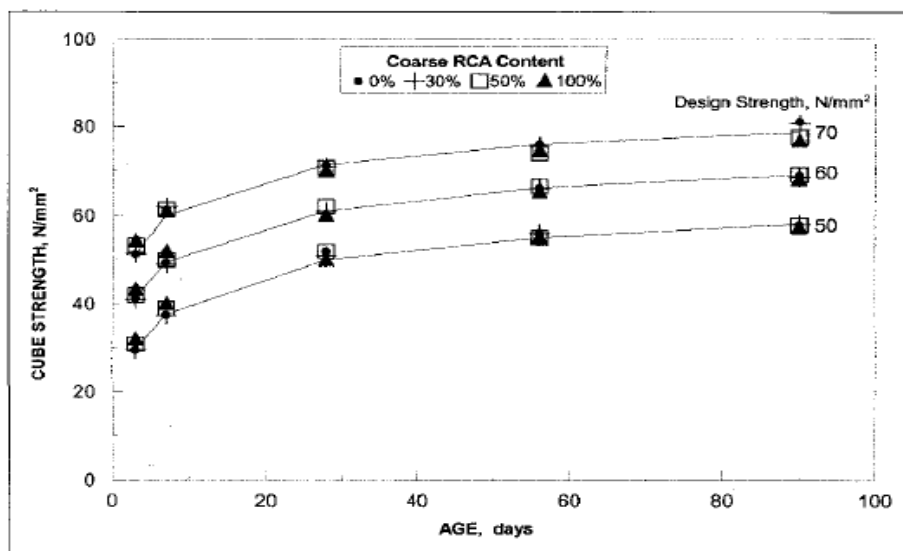


Figura 2:9 Evolución de la resistencia a compresión al paso del tiempo, para distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado [25].

Como podemos ver en la *figura 2.11*, los diferentes tipos de hormigones que se ensayaron llegaron a unas resistencias aproximadas entre ellos.

Etxeberria et al [10], hicieron un estudio comparando un hormigón convencional respecto tres hormigones con áridos reciclados de 20, 50 y 100 MPa. La mayoría de hormigones obtuvieron una resistencia compresión mayor que el convencional. Esto es debido a que al hormigón convencional se le añadió una mayor cantidad de agua en la mezcla y por lo tanto el agua libre fue influyente en la obtención de su resistencia a las 24 horas. Por otra parte, el árido reciclado al estar parcialmente saturado debido a su absorción, podría haber reducido la relación agua/cemento en la ITZ permitiendo obtener una mayor resistencia a compresión.

Resistencia a tracción indirecta, módulo de elasticidad y flexión

Los resultados obtenidos en el estudio realizado por Etxeberria [10] determinaron que todos los hormigones alcanzaban una resistencia a tracción indirecta, similar o superior a la del hormigón convencional. Incluso utilizando árido reciclado de baja resistencia (40 MPa), los resultados obtenidos eran muy parecidos.

Respecto a la resistencia a flexión, parece ser que esta propiedad se ve muy poco influenciada por la calidad o el % de sustitución del árido reciclado debido a que la unión entre la pasta de cemento y el agregado es muy parecida al hormigón convencional según varias investigaciones realizadas [11, 26].

Según Abas et al [4], el módulo de elasticidad para hormigones con árido reciclado es ligeramente menor respecto al convencional.

En la *figura 2.12*, podemos ver los valores obtenidos en el estudio de Etxeberria [10] viendo que los resultados son muy similares para cada tipología de hormigón:

Tabla 2:4 Resultados flexión, resistencia a tracción y módulo de diferentes tipos de hormigón [10].

Concrete reference	Flexural strength (MPa) 7-days	Tensile strength (MPa) 28-days	Elastic modulus (GPa) 28-days
CC	6.47	5.13	50.41
RC-20-100	7.42	5.71	48.54
RC-50-100	7.65	5.64	47.93
RC-100-100	6.84	5.12	46.10
RC-20-60	7.98	6.32	47.79
RC-50-60	6.80	5.10	44.28
RC-100-60	6.33	5.88	40.09
RC-20-40	6.70	5.31	48.29
RC-50-40	6.83	6.21	43.04
RC-100-40	6.53	4.20	37.15

2.8.4 Durabilidad del hormigón de altas prestaciones

Absorción capilar

Debido a la baja relación agua/cemento del hormigón reciclado, los valores obtenidos son similares al del hormigón convencional [10].

Penetración de iones de cloruro

Según los estudios de Etxeberria [10], contra mayor % de sustitución de áridos utilizásemos para la fabricación del hormigón, mayor debilidad tendría este frente los ataques a cloruros. Con una sustitución del 100% para áridos de 60 MPa se alcanzaban valores moderados del límite de corrosión.

2.9 Curado al vapor

La necesidad de que el hormigón obtenga unas buenas resistencias en las primeras horas tiene una gran importancia dentro del mundo de la construcción y en los prefabricados. El objetivo principal es otorgar al hormigón la resistencia deseada en un corto periodo de tiempo utilizando varias técnicas para acelerar su endurecimiento. El uso del curado a vapor es una técnica que se utiliza mucho alrededor de todo el mundo pudiendo obtener resistencias superiores a las diseñadas. Muchas plantas de hormigón prefabricado utilizan este método de curado para así poder aumentar su producción.

El uso del curado a vapor es una práctica muy común, pero muchos investigadores indican que puede ser perjudicial y que un retraso del tiempo de curado puede beneficiar a las propiedades del hormigón, tales como la durabilidad y la resistencia. Para el curado a vapor se tiene que tener en cuenta una serie de parámetros: tiempo de curado y las temperaturas en cada ciclo. Para cada tipo de cemento se tendrán que utilizar una temperatura diferente debido a las posibles interacciones entre la temperatura y la composición del cemento, según estipulo Al-Rawi [27].

Al inicio del proceso de curado al vapor se mantiene la temperatura constante y se va aumentando gradualmente hasta llegar al máximo donde se mantendrá durante un periodo de tiempo determinado. Finalizado este tiempo, empezara a disminuir la temperatura de forma continua hasta llegar a temperatura ambiente.

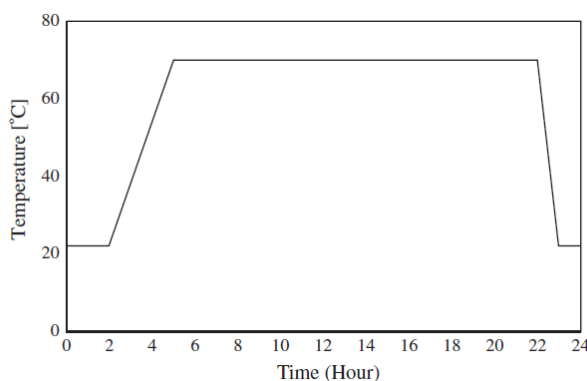


Figura 2:10 Ciclo curado al vapor [28].

En la *figura 2.13*, se observa la curva de curado ideal, que dependerá del tipo de cemento utilizado. El tiempo de curado en la mayoría de casos dura entre dos y cinco horas, la temperatura límite óptima ronda los 55-75°C sin sobrepasar los 80°C. La velocidad de enfriamiento y calentamiento no puede superar los 20°C por hora y el recinto de curado tiene que estar siempre saturado de humedad.

La aplicación del curado a vapor para periodos de retraso cortos (30-60 minutos) son perjudiciales para la obtención de la resistencia a compresión del hormigón. Dependiendo de la temperatura y con un periodo de retraso del curado entre 2 a 6 horas, las resistencias obtenidas a las 24 horas eran un 15-40% mayores que si el proceso de curado se realizaba al instante de introducir el hormigón en la cámara de vapor y estos hormigones eran más resistentes para todas las edades [29].

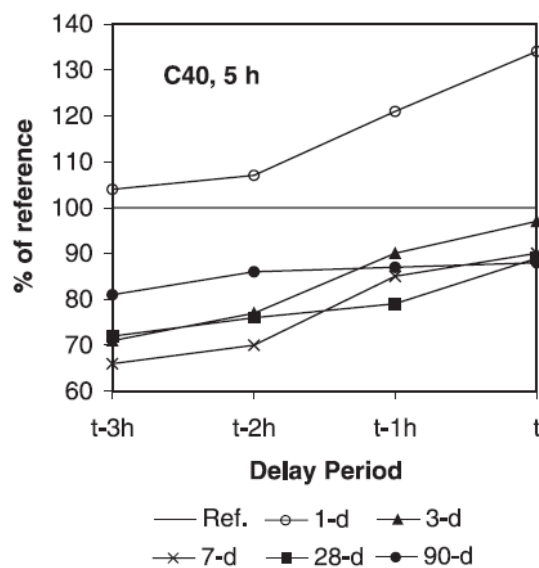


Figura 2:11 Evolución resistencias para un cierto periodo de retraso en el curado, a lo largo de un tiempo determinado [29].

En la *figura 2.14*, observamos el valor de las resistencias con un tiempo de retraso eran mayores que si se procedía al curado al vapor al instante para el valor de las resistencias a 24 horas. Para edades de 3 a 90 días, las resistencias eran menores respecto al que se obtiene como referencia.

En las muestras con un periodo de retraso de una hora, se observó la aparición de fisuras horizontales en las muestras. Se concluyó que el periodo de retraso debe estar determinado de forma que el curado a vapor no cause expansiones en el hormigón. Finalmente se obtuvo que para hormigones de peor calidad, el tiempo de retraso debía de ser menor [29].

Es muy importante escoger adecuadamente las temperaturas necesarias para cada ciclo de curado y el retraso del inicio del curado ya que en caso contrario, las retracciones térmicas pueden causar microfisuras y afectar negativamente a las resistencias del hormigón.

2.9.1 Hormigón Convencional

Mediante el uso del curado a vapor, el hormigón convencional obtiene mejores resistencias a un periodo corto de tiempo y mejora su comportamiento en cuanto a su durabilidad.

Resistencia a compresión

Para la resistencia a compresión, en el estudio de Kou et al [30], se comparó los distintos tipos de curado. Se observó que para el curado con cámara de vapor, las resistencias obtenidas en el primer día eran superiores a las resistencias con el curado en cámara húmeda. En cambio, para las edades de 28 y 90 días, las resistencias obtenidas en los hormigones curados con vapor eran menores respecto a los curados en cámara húmeda.

En las *figuras 2.15*, se observa parte de las resistencias obtenidas por los diferentes métodos de curado.

Tabla 2:5 Resistencias obtenidas a lo largo de un tiempo determinado dependiendo de la tipología del hormigón, dependiendo del tipo de curado.

NOTATION	FLY ASH (%)	RECYCLED AGGREGATE (%)	COMPRESSIVE STRENGTH (MPa)				
			1-day	4-day	7-day	28-day	90-day
R0	0	0	25.8	45.8	53.8	66.8	72.3
R20	0	20	23.6	43.2	51.2	62.4	68.0
R50	0	50	21.1	40.3	44.8	55.8	61.5
R100	0	100	15.5	26.8	36.2	42.0	50.2

NOTATION	FLY ASH (%)	RECYCLED AGGREGATE (%)	COMPRESSIVE STRENGTH (MPa)				
			1-day	4-day	7-day	28-day	90-day
R0	0	0	41.8	49.6	53.2	58.1	63.9
R20	0	20	41.9	47.9	50.3	57.4	65.9
R50	0	50	38.0	41.9	46.7	55.1	62.2
R100	0	100	28.1	32.1	35.7	41.4	48.4

Absorción del agua

Según Ramezaniapour [31], se ensayaron varias muestras a la edad de 28 días y se observó que para un pico constante de temperatura y un periodo de curado determinado, los mayores valores de absorción fueron obtenidos en las muestras que tenían un retraso de 1 hora en el tiempo de curado.

En la *figura 2.16*, se puede observar los 3 diferentes ciclos de curado:

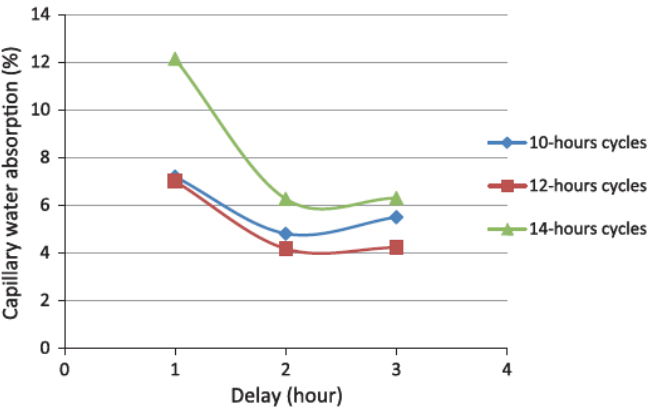


Figura 2:12 Relación absorción de agua respecto el tiempo de retraso del curado [31].

En el ciclo de 14 horas se obtiene el valor mayor de absorción de agua demostrando los posibles efectos negativos de la exposición del hormigón a estos ciclos. Por último, se calculó el % de absorción para ciclos de 50°C con un valor del 6,4% de absorción, mientras que para ciclos con temperaturas de 60-70°C, su valor es del 5,5%. Esto implica que incrementar la temperatura de 60°C a 70°C no mejora la impermeabilidad del hormigón, siendo algo crucial debido al gran coste energético que puede suponer aumentar la temperatura en las plantas de prefabricado.

2.9.2 Hormigón con áridos reciclados

Según varios estudios, los hormigones reciclados como los hormigones convencionales se ven afectados de una forma similar para las condiciones de curado al vapor. Las propiedades analizadas en el hormigón reciclado fueron la resistencia a compresión, el módulo elástico, la resistencia a tracción indirecta y la penetración de cloruros.

Resistencia a compresión

Para hormigones con áridos reciclados y curado con vapor, según Kou [30], las resistencias a todas las edades se veían disminuidas contra mayor era el % de sustitución del árido reciclado. Con el curado a vapor, todos los hormigones con árido reciclado obtenían mayores resistencias para la edad de 1 día respecto un hormigón convencional, pero a las edades de 28 y 90 días sus resistencias se veían disminuidas respecto al convencional.

Resistencia a tracción indirecta

Un incremento del % de árido reciclado en el contenido del hormigón disminuye la resistencia a tracción indirecta. Parecido a la resistencia a compresión, con el curado a vapor aumentan las resistencias a tracción indirecta para la edad de 1 día, pero la diferencia reside en que para las edades de 28 y 90 días, esta resistencia es similar o incluso superior a las resistencias obtenidas por un curado en cámara húmeda [30].

Módulo estático de elasticidad

Como ya se ha comentado, el módulo de elasticidad decrece a medida que se aumenta el contenido de áridos reciclados en el hormigón. El módulo de elasticidad para un hormigón con un 100% de sustitución era más de un 20% menor que el módulo de un hormigón convencional para las edades de 28 y 90 días. El curado a vapor tiene un efecto negativo en el módulo para hormigones convencionales, este no afectó al módulo de los hormigones reciclados [30].

Penetración de iones de cloruros

Según Kou [30], se descubrió que el uso del curado a vapor incrementaba la resistencia contra los ataques a cloruros, sin embargo, a mayor % de sustitución de árido reciclado, menor era la resistencia del hormigón a los ataques de cloruros.

En la *figura 2.17*, podemos ver una comparación de los diferentes tipos de curados y cómo reaccionan a los ataques de cloruros.

Tabla 2:6 Reacción a los ataques de cloruros para los diferentes tipos de hormigón [30].

Table 10 Chloride-ion penetrations of concrete mixtures

NOTATION	FLY ASH (%)	RECYCLED AGGREGATE (%)	TOTAL CHARGE PASSED (Coulombs)			
			Standard water cured		Steam cured	
			28-day	90-day	28-day	90-day
R0	0	0	3239	2427	2680	1485
R20	0	20	3643	2528	2956	1600
R50	0	50	4620	2609	3276	1740
R100	0	100	4957	3562	3940	2807

3 Metodología y ensayos

3.1 Introducción

En este apartado se explicara la metodología seguida para la fabricación del hormigón reciclado, los distintos hormigones utilizados y los dos métodos de curado, el curado en cámara húmeda y el curado en cámara de vapor (SC).

Primero se caracterizó los materiales que se utilizaran en la fabricación del hormigón ya que se deben conocer sus características a la hora de realizar un estudio. Una vez finalizada esta fase, se inició la fase de fabricación donde se distinguieron tres fases de estudio:

- **1ra Fase:** Se utilizó una proporción de agua/cemento de 0,28 y un tamaño del árido entre 4-12 milímetros.
- **2da Fase:** Se mantiene el tamaño del árido utilizado y se varía la relación agua/cemento a un 0,38.
- **3ra Fase:** Manteniendo la misma relación agua/cemento que en la 2da fase, aumentamos el tamaño del árido reciclado, dividiendo entre la gravilla (4-12mm) y la grava (12-20mm).

En las tres fases se fabricó hormigón con áridos naturales y con tres tipologías distintas de hormigón reciclado de 40MPa, 60MPa y 100MPa. Una vez fabricado se realizaron dos tipos de curado; el curado a vapor (SC) durante las primeras 24 horas y curado en cámara húmeda.

La fabricación de los distintos hormigones se distribuyó en tres fases en las cuales se pudieron fabricar todas las tipologías de hormigón expuestas, excepto en la segunda fase que no pudo fabricarse hormigón con árido reciclado de 60MPa debido a problemas de stock ya que en la 1ra fase se terminó la reserva de dicho hormigón.

En la 2da fase se fabricó hormigón de 60 MPa para tener suficiente cantidad para realizar la 3ra fase del estudio. El objetivo de estas fabricaciones es el estudio de las propiedades mecánicas a las 24h, 28 y 90 días; y determinar la durabilidad de los distintos tipos de hormigón a los 28 días.

Durante la fase de fabricación los áridos reciclados se encontraban por debajo de su capacidad de absorción debido a que nos interesaba obtener unas resistencias determinadas. Se realizaron un total de 11 fabricaciones para poder ensayar las propiedades físicas (porosidad y densidad), propiedades mecánicas (resistencia a compresión, módulo de elasticidad y resistencia a tracción indirecta) y las propiedades de durabilidad (succión, UPV y resistencia a la penetración de cloruros).

3.2 Caracterización de los Materiales

3.2.1 Cemento

El cemento utilizado durante el proceso de fabricación fue un CEM I 52,5 N las propiedades de dicho cemento no las tenemos debido a que se envió una muestra a analizar y aún no llegó el resultado.

Tabla 3:1 Composición química del cemento.

Composición (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	LOI
Cemento CEM I 52.5N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Esto es una aproximación de los valores medios obtenidos en un cemento CEM I 52,5 N:

Tabla 3:2 Propiedades del CEM I 52.5 N.

	Especificación	Valor medio
Clínker (%)	95-100	95,3
Componentes minoritarios (%)	0-5	4,7
Pérdida al fuego (%)	< 5	2,8
Residuo insoluble (%)	< 5	0,2
Cloruros, Cl (%)	< 0,01	0,01
Sulfatos, SO₃ (%)	< 4	1,7
Expansión (mm)	< 10	0,5

3.2.2 Áridos

Durante el proceso de fabricación se utilizaron dos tipos de áridos, naturales para la fabricación de hormigón convencional; y áridos reciclados para el resto.

En los **áridos naturales** se utilizó:

- Grava de río natural con un tamaño entre 4-11mm y grava triturada de 4-10mm.
- Arena de río natural con un tamaño entre 0-2mm y una misma arena de 0-4mm.

Para la obtención de los áridos reciclados del tamaño deseado (4-12mm o 4-20mm) fue necesario machacar y triturar el material disponible en el laboratorio hasta obtener la cantidad y medida perfecta para el estudio.

Para obtener estos áridos, fue necesario romper los bloques con una maza y posteriormente triturarlos en la machucadora del laboratorio de materiales de la UPC y una machucadora pequeña en la facultad de Geología de la UB. En la 3ra fase solo fue necesario el uso de las instalaciones de la UPC debido a que utilizamos un tamaño mayor de árido en comparación con el resto de fases.



Figura 3:1 Maquinaria utilizada para triturar y tamizar el árido.

Finalizado el proceso de trituración, a continuación tamizamos todo el material obtenido y dependiendo de la fase de estudio utilizaremos unos distintos tamices:

- En la 1ra y 2da fase utilizaremos un tamiz de 12,5mm para la fracción más gruesa y uno de 4mm para la más pequeña.
- En la 3ra fase seguiremos utilizando el mismo tamiz para la fracción más pequeña y utilizaremos un tamiz de 20mm para la gruesa. Diferenciaremos el material obtenido entre el tamiz 4 y 12.5 como gravilla; el resto se considerara grava.

Granulometría

Utilizando la norma UNE EN 933-1:1998, determinamos el tamaño de las partículas de los áridos ensayados especificando las aberturas de los tamices y el tamaño nominal. Para obtener la granulometría de los áridos naturales se han utilizado en el caso de gravas: 12,5 10 8 6,3 5 4 2; y para las arenas se han utilizado: 5 4 2 1 0,25 0,125 y 0,063.

Áridos

Para la grava natural triturada, la de río y la grava obtenida mediante los áridos reciclados, la granulometría obtenida es la siguiente:

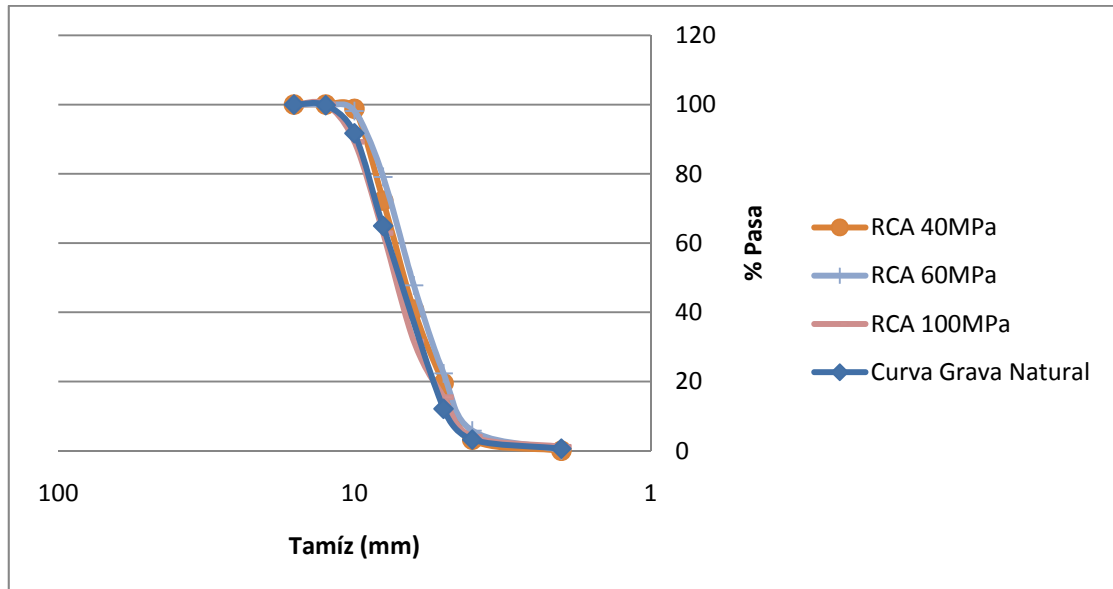


Figura 3:2 Curva granulométrica de las distintas gravas.

Para el caso de arena natural (0/2mm) y arena natural (0/4mm), se muestran en la siguiente figura:

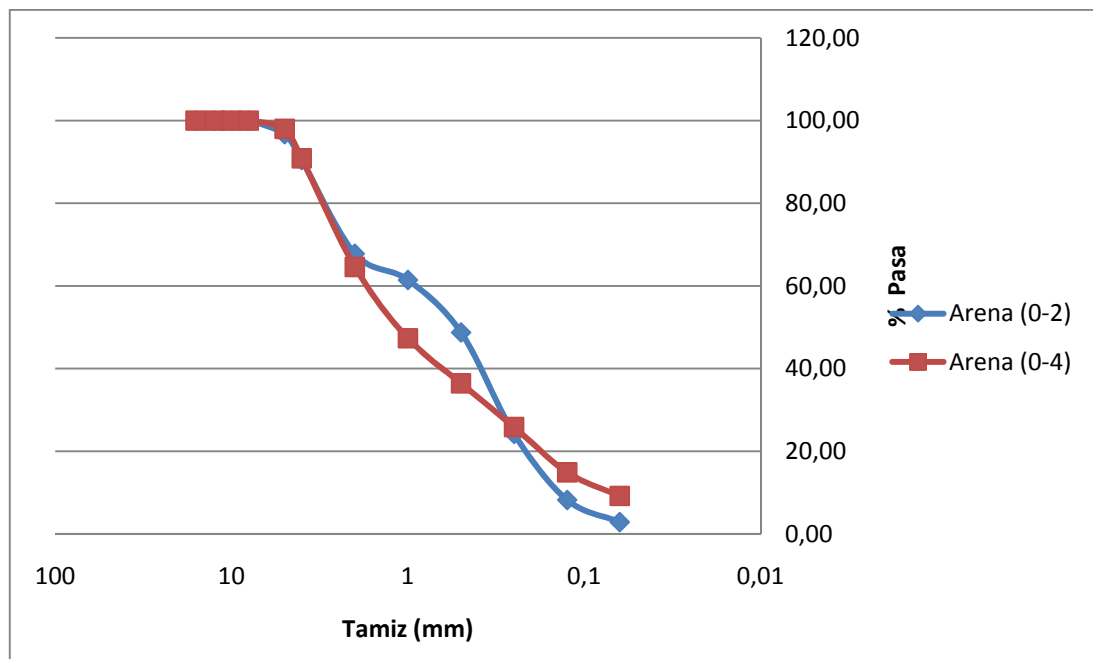


Figura 3:3 Curva granulométrica de las arenas.

Para la 3ra fase se dividieron los áridos reciclados en gravilla (4/12mm) y grava (12/20mm), donde la curva granulométrica obtenida es la siguiente para las distintas tipologías:

Grava

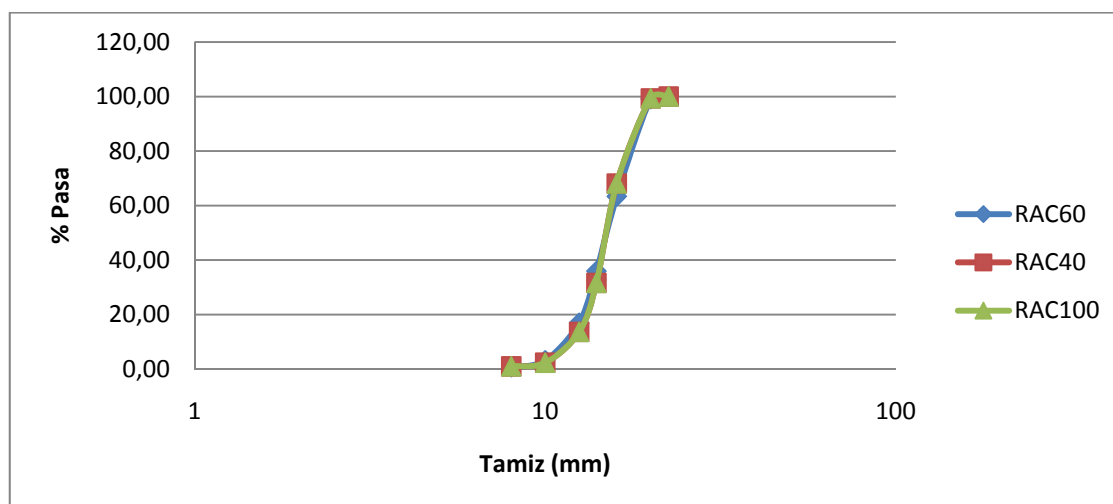


Figura 3:4 Curva granulométrica de las gravas obtenidas en la fase 3.

Gravilla

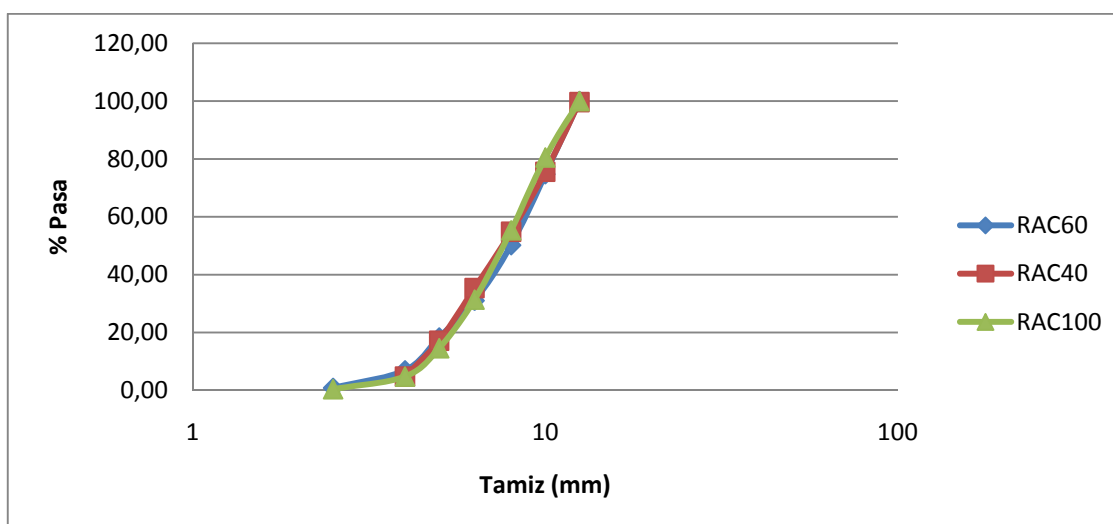


Figura 3:5 Curva granulométrica de las gravillas obtenidas en la fase 3.

Podemos determinar que los áridos reciclados presentan una granulometría adecuada, ya que las curvas granulométricas entre ellos y los áridos naturales son muy similares.

Densidad y absorción de las partículas

Inicialmente se satura la muestra sumergida en agua durante 24h. Una vez transcurrido este tiempo, se saca la muestra y se seca con una toalla para eliminar la humedad superficial del árido, obteniendo el peso saturado de la muestra. A continuación obtenemos el peso hidrostático y dejamos la muestra en una bandeja para proceder al secado durante 24 horas en una estufa a 105°C determinando el peso seco.

Una vez obtenido el peso saturado, hidrostático y seco de las muestras, podemos obtener su densidad y absorción:

Densidad:
$$Dens = \frac{Psec}{(Psat - Phidro)}$$

Absorción:
$$Abs = 100 * \frac{(Psat - Psec)}{Psec}$$

Donde;

- Psec es el peso seco obtenido en la muestra después de dejar secando durante 24 horas en la estufa.
- Psat es el peso saturado obtenido después de dejar la muestra sumergida en agua durante 24 horas.
- Phidro es el peso hidrostático medido una vez hemos obtenido el peso saturado de la muestra.

Para la arena y la grava natural:

Tabla 3:3 Densidad de la arena y grava natural.

	Densidad seca (kg/m3)	Absorción (%)
Arena (0/2)	2,54	1,02
Arena (0/4)	2,57	1,93
Gravilla (4-11)	2,61	1,29
Gravilla (4-10)	2,68	2,13

Para los áridos reciclados de las diferentes tipologías:

Tabla 3:4 Densidad de las gravas recicladas.

	Densidad seca (kg/m3)	Absorción (%)
Rac40	2,30	5,9
Rac60	2,39	4,9
Rac100	2,47	3,7

3.2.3 Aditivo

Durante las 3 fases de fabricación, se utilizó un aditivo superplastificante de alto rendimiento (Sika Visocrete 20HE) permitiendo mejorar varios aspectos del hormigón como:

- Retardador de los efectos de la carbonatación.
- Altas resistencias iniciales.
- Reducción importante del contenido en agua durante el amasado.
- Mejora en la autocompactación del hormigón.

Se utilizara entre un 0,5 y un 1,5% del peso del cemento que utilizemos.

3.3 Proceso de fabricación del hormigón

3.3.1 Fabricación

Se ha utilizado el mismo proceso durante las 3 fases de fabricación del hormigón. Utilizamos una amasadora de eje vertical durante todo el proceso de fabricado.



Figura 3:6 Amasadora de eje vertical.

Dentro del capazo de la amasadora introducimos primero la fracción más grande de árido (grava natural, triturada o reciclada) y luego añadimos la fracción pequeña.

A continuación añadimos el cemento y se mezcló el conjunto con un poco de agua. Se inició el primer ciclo de la amasadora y se fue añadiendo agua conjuntamente con el aditivo, intentando que llegara a toda la superficie de la mezcla.

Una vez terminado, se inició un segundo ciclo para asegurar que la mezcla del hormigón fuese homogénea.

Si durante el proceso de mezclado observamos que el hormigón no es lo suficientemente trabajable, podemos introducir más cantidad de aditivo para mejorar esta característica.

3.3.2 Dosificación

La dosificación empleada durante la fase de fabricación se ha realizado mediante el método de Fuller con una relación de agua/cemento efectiva de 0,287 para la fase 1 y de 0,38 para la fase 2.

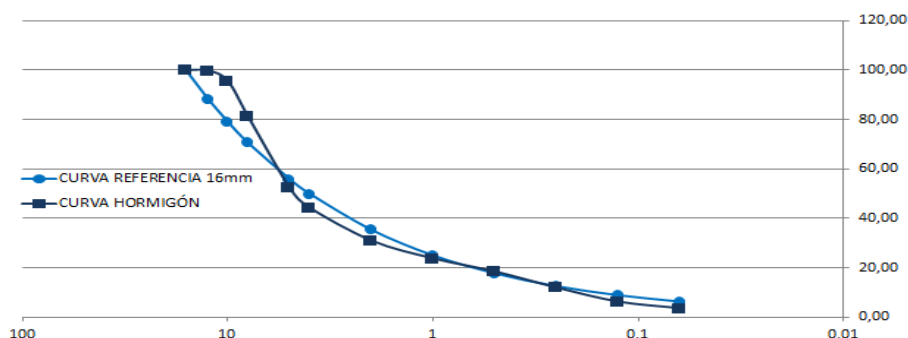


Figura 3:7 Curva teórica de Fuller – Curva Hormigón.

Durante la fase de fabricación, se fijó la relación a/c efectiva para comparar los resultados entre las distintas tipologías de hormigón reciclado. Para la 2 y 3 fase, se aumentó la relación a/c efectiva, para obtener unas resistencias menores y poder observar mayores diferencias entre los distintos tipos de hormigón reciclado.

En la fabricación, los áridos reciclados se deben encontrar alrededor del 85% de saturación, las arenas naturales deben de estar entre un 3-4% de humedad y las gravas naturales en estado seco.

En total se realizaron 11 dosificaciones diferentes, 4 con una relación a/c de 0,287 y el resto con una relación a/c de 0,38. Durante la 2ª fase, por problemas de stock no se pudieron realizar fabricaciones con el árido reciclado de 60 MPa.

En la siguiente tabla se encuentran las nomenclaturas de las distintas dosificaciones empleadas:

Tabla 3:5 Nomenclatura hormigones.

Tipología	Nomenclatura
1a Fase	
Hormigón Convencional	NAC
Hormigón con árido reciclado de 40 MPa	RAC-40
Hormigón con árido reciclado de 60 MPa	RAC-60
Hormigón con árido reciclado de 100 MPa	RAC-100
Con curado a vapor (Steam curing)	SC
Hormigón Convencional	NAC-SC
Hormigón con árido reciclado de 40 MPa	RAC-40-SC
Hormigón con árido reciclado de 60 MPa	RAC-60-SC
Hormigón con árido reciclado de 100 MPa	RAC-100-SC
2a Fase	
Hormigón Convencional	1NAC
Hormigón con árido reciclado de 40 MPa	1RAC-40
Hormigón con árido reciclado de 100 MPa	1RAC-100
Con curado a vapor (Steam curing)	*
Hormigón Convencional	1NAC-SC
Hormigón con árido reciclado de 40 MPa	1RAC-40-SC
Hormigón con árido reciclado de 100 MPa	1RAC-100-SC
3a Fase	
Hormigón Convencional	2NAC
Hormigón con árido reciclado de 40 MPa	2RAC-40
Hormigón con árido reciclado de 60 MPa	2RAC-60
Hormigón con árido reciclado de 100 MPa	2RAC-100
Con curado a vapor (Steam curing)	*
Hormigón Convencional	2NAC-SC
Hormigón con árido reciclado de 40 MPa	2RAC-40-SC
Hormigón con árido reciclado de 60 MPa	2RAC-60-SC
Hormigón con árido reciclado de 100 MPa	2RAC-100-SC

Dosificaciones campaña experimental

Tabla 3:6 Dosificaciones campaña experimental.

Hormigón	Arena 0-2	Arena 0-4	Grava 4-11	Grava 4-12	Árido reciclado	Cemento (kg)	Agua (kg)	a/c efectiva	Aditiv o (%)
NAC	215,4	711,7	302,04	784,47	-	380	109,06	0,287	1,5
RAC-40	215,2	711,77	-	-	939	380	109,06	0,287	1,5
RAC-60	215,2	711,7	-	-	975,07	380	109,06	0,287	1,5
RAC-100	215,2	711,7	-	-	1010,2	380	109,06	0,287	1,5
1NAC	205,5	679,1	288,19	748,48	-	380	144,4	0,38	1,5
1RAC-40	205,3	679,1	-	-	895,92	380	144,4	0,38	1,5
1RAC-100	205,3	679,1	-	-	963,82	380	144,4	0,38	1,5
2NAC	-	933,6	200,9	731,8	-	380	160	0,38	1,5
2RAC-40	-	933,6	-	-	827,2	380	198,8	0,38	1,5
2RAC-60	-	933,6	-	-	831,5	380	197,3	0,38	1,5
2RAC-100	-	933,6	-	-	880,1	380	181,7	0,38	1,5

3.3.3 Cono de Abrams

Justo después del amasado de la mezcla del hormigón, aprovechando que el hormigón está fresco, se ensayara mediante el cono de Abrams para determinar la consistencia del hormigón obtenido mediante la fabricación y ver si es la que le corresponde en la dosificación calculada.

Necesitaremos para realizar el ensayo un cono estandarizado, una base metálica, una varilla y una regla. Mientras una persona aguanta el cono pisando las pestañas que lleva incorporado, otro rellenara el cono hasta 1/3 parte del total. Se procederá a compactar mediante la varilla, golpeando 25 veces el hormigón. Este proceso se realizara dos veces más, hasta llenar al completo el cono y enrasar la superficie. Una vez finalizado, se levanta el cono con cuidado y se coloca al lado en posición inversa, midiendo el asentamiento producido en el hormigón fresco.

Tabla 3:7 Docilidad del hormigón fresco, EHE-08.

Consistencia	Asentamiento (cm)
Seca	0-2
Plástica	3-5
Blanda	6-9
Fluida	10-15
Líquida	>16

Una vez medido los centímetros que ha descendido el hormigón fresco respecto el cono de Abrams, mediante una tabla podemos determinas su consistencia. Los hormigones fabricados durante las 3 fases tienen una consistencia fluida, para poder trabajar en mejores condiciones.

3.3.4 Probetas, densidad y compactación del hormigón fresco

Durante las 3 fases se han utilizado un número determinado de probetas para cada una de las dosificaciones:



Figura 3:8 Molde cubico y cilíndrico.

En total se utilizaron 48 probetas cubicas de 10x10cm y 14 probetas cilíndricas de 20x10cm.

En cada una de las fabricaciones, la mitad de las probetas se destinaron para la cámara de curado a vapor y el resto en temperatura ambiente (durante las primeras 24 horas). Los moldes de las probetas se pintaban con un aceite especial, para evitar que el hormigón se pegue una vez procedamos a desmoldarlas.

Las probetas se llenan hasta la mitad y mediante la mesa de vibrado, compactamos la mezcla y evitamos la existencia de posibles huecos dentro del hormigón. Una vez llenadas, se enrasa para obtener la cara lisa y eliminar el material sobrante.

Mientras se van rellenando las probetas, procedemos a determinar la densidad del hormigón fresco, donde la densidad experimental del hormigón fabricado se debe corresponder a la densidad teórica obtenida por la dosificación.

Una vez tengamos las probetas llenas, se procederá a cubrirlas mediante una malla húmeda y un plástico para evitar la evaporación de agua. Pasadas 24 horas se procederá a desmoldar.

3.3.5 Curado al vapor

La cámara de vapor es un contenedor estanco con agua, donde en la parte inferior se encuentran unas resistencias que van aportando la temperatura necesaria que necesitamos para nuestro estudio.

Inicialmente, la cámara se encuentra a 30°C durante las primeras 4 horas. Pasado este intervalo de tiempo, se incrementa la temperatura hasta los 60°C y se mantiene durante 12 horas. Pasado este tiempo, se disminuye hasta 47°C y pasadas 4 horas se procede a apagar la cámara de curado al vapor, permitiendo durante este proceso un descenso de la temperatura hasta poder empezar a desmoldar las probetas.

El ciclo de curado al vapor se puede observar en la *figura 3.9*:

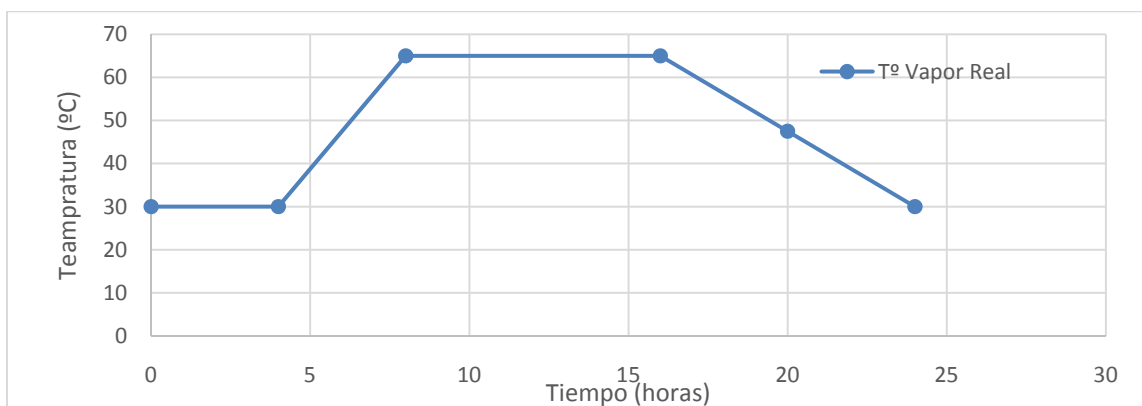


Figura 3.9 Ciclo curado al vapor.

3.3.6 Desmoldar y marcaje de las probetas

Finalizados los tiempos de curado a 24 horas, se procede a desmoldar las probetas y a marcaje de la tipología, la fecha de fabricación y el tipo de curado. Estas probetas son introducidas en la cámara de curado donde se mantienen condiciones estacionarias de 21°C y una humedad del 95%.



Figura 3:10 Cámara húmeda.

Las probetas estarán siempre almacenadas en esta cámara hasta que se ensayan a 1, 28 y 90 días.

3.4 Ensayos del hormigón endurecido

En este apartado se explicaran los diferentes tipos de ensayos que se han realizado durante la campaña experimental para obtener sus propiedades físicas, mecánicas y la durabilidad.

3.4.1 Ensayos mecánicos

Ensayo de compresión

Este ensayo se realiza para determinar la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 1, 28 y 90 días. En cada ensayo se usan 6 probetas cubicas de 10x10cm para cada tipo de dosificación (3 de curado normal y 3 de curado al vapor).



Figura 3:11 Prensa mecánica.

El ensayo consiste en comprimir las probetas mediante una carga hasta alcanzar su rotura. La máquina va ejerciendo una carga a las probeta donde el aumento de la tensión media que se aplica es de un $0.5 \pm 2 \text{MPa/s}$. Este incremento se mantiene constante hasta la rotura de la probeta. La resistencia a compresión del hormigón será la carga máxima alcanzada en el ensayo.

Ensayo de tracción indirecta – Ensayo Brasileño

Se ensayan las probetas a 28 días y se ensayaron 4 probetas cilíndricas de $10 \times 20 \text{cm}$ para cada tipo de dosificación (2 de curado normal y 2 de curado al vapor). Este ensayo se realiza utilizando el mismo aparato que en el ensayo a compresión, la diferencia reside en la colocación de los platos que producen la rotura. La probeta es colocada horizontalmente, dejando las superficies planas perpendiculares al plato de carga. La carga se aplica de forma continua, con una tensión de la tracción indirecta de $0,3 \pm 0,1 \text{MPa/s}$.

Para calcular la tensión indirecta utilizaremos la siguiente formula:

$$F_{ti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d}$$

Donde;

- **F_{ti}** es la tensión indirecta.
- **P** es la carga aplicada.
- **l** es la longitud de la probeta.
- **d** es el diámetro de la probeta.

Módulo de elasticidad

Se ensayan las probetas a 28 días y se ensayaron 4 probetas cilíndricas de $10 \times 20 \text{cm}$ para cada tipo de dosificación (2 de curado normal y 2 de curado al vapor). Para este ensayo es necesario aplicar la carga a una cierta velocidad y que se mantenga en escalones (carga-descarga). Se miden los cambios de longitud que va experimentando la probeta a medida que se aplica $1/3$ de la carga máxima.

La tensión se va incrementando de forma uniforme a una velocidad de $0,5 \pm 2 \text{N/mm}^2/\text{s}$ hasta alcanzar $1/3$ de la carga máxima. Este valor se mantiene durante 60 segundos y se registran las variaciones obtenidas.

3.4.2 Ensayos físicos

Ensayo de densidad, absorción y poros accesibles

Para este tipo de ensayo, se utilizaron 3 probetas cubicas de $10 \times 10 \times 10 \text{cm}$ de cada tipología, fase y tipo de curado a los 28 días de edad. Las probetas son introducidas en un horno durante 48 h obteniendo su peso seco.

Una vez sacadas del horno, se procede a dejar las probetas sumergidas en agua durante 72 h donde procedemos a obtener el peso saturado e hidrostático de las probetas. Después de este

proceso, las probetas son introducidas en una olla con agua hirviendo durante 6 horas. Pasadas 24 h, se vuelve a medir el peso saturado e hidrostático de las probetas.

- Absorción después de la inmersión: $\frac{P_{sat}-P_{sec}}{P_{sec}} \times 100$
- Absorción después del hervido: $\frac{P_{her}-P_{sec}}{P_{sec}} \times 100$
- Densidad aparente seca: $\frac{P_{sec}}{P_{her}-Ma} \times \rho$
- Densidad aparente después del hervido: $\frac{P_{her}}{P_{her}-Ma} \times \rho$
- Densidad aparente: $\frac{P_{sec}}{P_{sec}-Ma} \times \rho$
- Volumen de poros accesibles: $\frac{D_{ap}-D_{sec}}{D_{ap}} \times 100$

Donde;

- P_{sat} es el peso saturado.
- P_{sec} es el peso seco.
- P_{her} es el peso hervido.
- Ma es la masa aparente de agua.
- ρ es la densidad del material.
- D_{ap} es la densidad aparente.
- D_{sec} es la densidad aparente seca.

3.4.3 Durabilidad

Ensayo UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

Este ensayo se realiza a la edad de 28 días y consiste en determinar la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos a través de probetas cubicas de 10x10cm. Se utilizaron 3 probetas para cada tipo de tipología, fase y curado.



Figura 3:12 Ensayo UPV.

El proceso consiste en colocar un emisor y un receptor a cada lado de la probeta, y una vez calibrado el aparato, realizar la lectura. Antes hay que medir los lados de la probeta mediante un pie de rey y utilizar un poco de gel para mejorar el contacto entre la probeta y el emisor/receptor permitiendo una mejor transmisión.

Ensayo Succión Capilar

Es un ensayo que se realiza a los 28 días y se utilizan 3 probetas cubicas de 10x10cm para cada tipología, fase y tipo de curado del hormigón. En este ensayo se calcula la cantidad de agua que puede absorber una probeta de hormigón a través de su base, y por lo tanto, está vinculado con la estructura porosa del hormigón.

Las caras laterales se impermeabilizaron para imposibilitar cualquier tipo de absorción que no sea por la base de la probeta. Después se dejaron en un horno a 50°C secando. Este proceso es lento pero evita la aparición de posibles fisuras produciendo errores en los resultados.

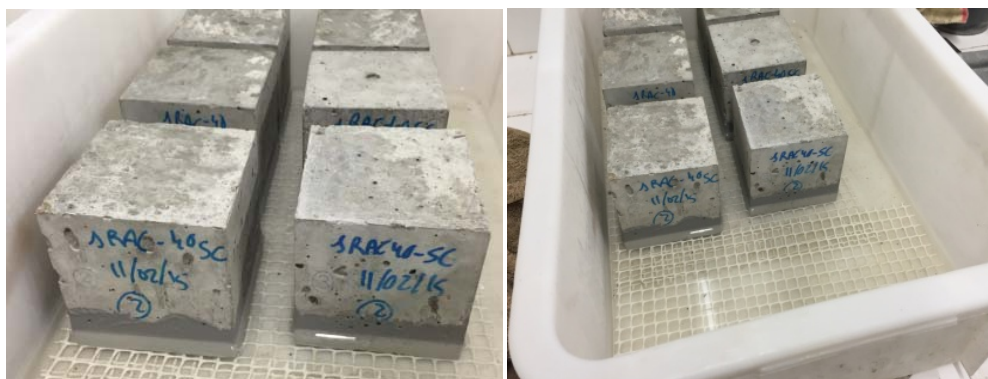


Figura 3:13 Ensayo succión capilar.

Una vez las probetas están secas, se obtiene su peso y se procede a dejarlas en un contenedor con agua, donde su nivel sea 5mm superior a la base de la probeta de hormigón. Los tiempos en los que tomaremos el peso de las probetas para ir midiendo la absorción de agua son 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120 y 360 min, y después a las 24, 48 y 72 horas.

Ensayo de penetración a cloruros

Este ensayo se realiza a los 28 y 90 días de edad, midiendo la resistencia del hormigón a través del paso de los iones de cloruros por sus poros. Es decir, a mayores resistencias, más dificultades para que circulen los iones de cloruros, y por lo tanto, el hormigón resistirá mejor el ataque de los cloruros.

Las probetas cilíndricas se cortan en trozos de 5cm cada uno, y los trozos centrales son impermeabilizados para evitar porosidades y resultados erróneos en el ensayo. En este ensayo se utilizaran 2 discos para cada dosificación y tipo de curado para comprobar que no exista dispersión en las distintas partes de la probeta.

Los discos son introducidos en una bomba de vacío durante 24 horas para saturarlos. Para realizar el ensayo necesitaremos preparar 2 disoluciones, cloruro de sodio (NaCl) e hidróxido de sodio (NaOH). Para prepararlas necesitaremos disolver en 1 litro de agua destilada 12 gramos de NaOH, y para la otra disolución 30 gramos de NaCl.



Figura 3:14 Ensayo penetración cloruros.

Se monta la estructura del ensayo y se conecta a una fuente de corriente (60 Voltios), conectando al polo negativo el NaCl y al positivo el NaOH. Durante 6 horas, se medirá el amperaje de las muestras cada 30 minutos.

La carga eléctrica se determinará mediante la siguiente formula:

$$Q = 900x(I_0 + 2xI_{30} + 2xI_{60} + \dots + 2xI_{300} + 2xI_{330} + 2xI_{360})$$

Según la normativa ASTM C1202 para la resistencia al paso de los iones de cloruros tenemos:

Tabla 3:8 Rango de valores ASTM C1202, penetración de cloruros.

Rango	Valor
Alto	>4000
Moderado	4000-2000
Bajo	2000-1000
Muy Bajo	1000-100
Despreciable	<100

4 Resultados Fase experimental curado normal

4.1 Introducción

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos durante la fase experimental determinando las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad de los diferentes hormigones fabricados durante las 3 fases de estudio. En este apartado se estudiarán las diferentes tipologías de hormigones con un curado normal.

4.2 Ensayos del hormigón endurecido (NC), Propiedades mecánicas

A continuación se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos a resistencia a compresión simple, a tracción y a módulo de elasticidad para diferentes edades.

4.2.1 Resistencia a compresión simple

Durante la fase experimental se ensayaron todas las probetas a compresión para las edades de 1, 28 y 90 días. En la *tabla 4:1* se muestran los resultados obtenidos en cada una de las fases.

Fase 1

Tabla 4:1 Resistencia a compresión (NC), fase 1, 24 horas, 28 y 90 días.

Hormigón	24h (Mpa)	28 días (Mpa)	90 días (Mpa)
NAC	63,22	88,34	93,12
RAC100	62,13	91,53	98,85
RAC60	65,25	84,41	93,45
RAC40	60,67	84,08	90,02

De los resultados obtenidos en la **fase 1** se puede observar como durante las primeras 24h, solo el RAC60 es el único que supera en resistencia al hormigón de referencia o convencional (NAC).

En los resultados obtenidos a los 28 días, el hormigón que obtuvo una mayor resistencia respecto al de referencia fue el RAC100 con un valor del 3,6% superior al NAC. En cambio, el hormigón RAC40 obtuvo el peor valor, un 4,82% inferior que el hormigón de referencia.

Transcurridos los 90 días, el hormigón que alcanza la mayor resistencia fue el RAC100 con un valor del 7,95% superior al hormigón de referencia. El RAC40 fue el único que quedó por debajo del hormigón convencional, un 1,69% inferior al NAC.

En la *figura 4.1*, podemos ver los resultados obtenidos a los 28 días, durante los 28 y 90 días y finalmente a los 90 días. En la gráfica, el hormigón convencional representa el 100% de la resistencia que se ha alcanzado y se pueden observar los distintos valores que se encuentran por encima o debajo del valor de referencia.

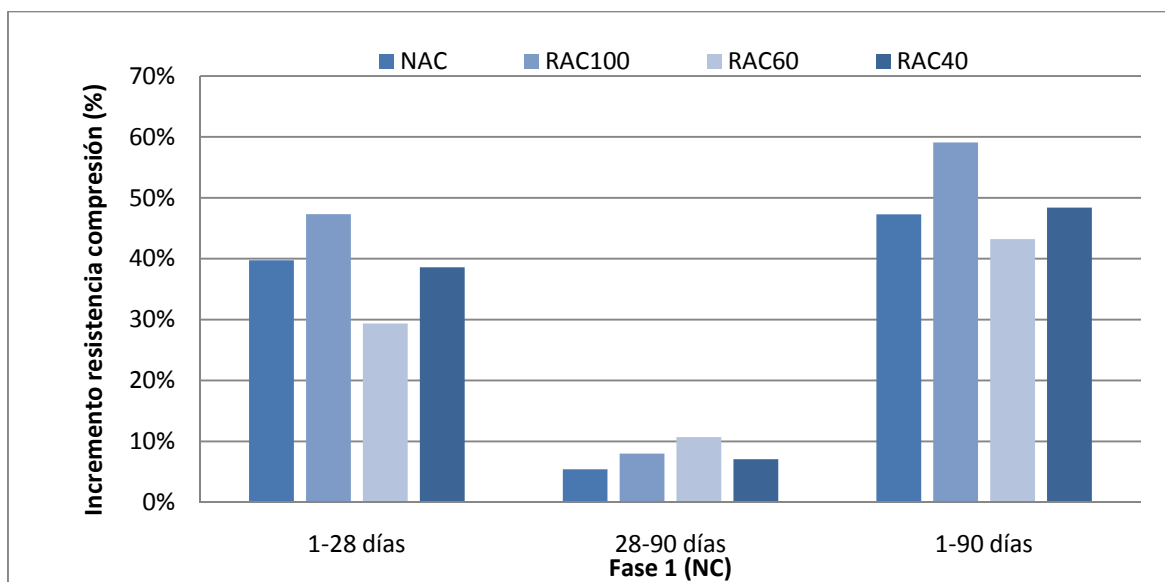


Figura 4:1 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.

En los primeros 28 días podemos observar que el único hormigón con un incremento mayor de su resistencia respecto al hormigón de referencia es el RAC60 siendo este un 7% superior. Como dijo Etxeberria [10], a los 28 días la calidad del árido reciclado desempeña un papel muy importante a la hora de otorgar resistencias al hormigón. La menor resistencia es del RAC40 debido a que es el árido reciclado de peor calidad.

Para la edad de 90 días, se observa que los únicos hormigones que superan la resistencia del hormigón de referencia son el RAC60 (0,3%) y el RAC100 (6,15%), siendo este último el que obtiene un mayor incremento de su resistencia respecto al hormigón convencional. El peor resultado lo obtuvo el RAC40 donde su resistencia fue un 3% inferior al de referencia.

Si estudiamos la evolución de las resistencias de los hormigones desde los 28 a los 90 días, podemos observar como el hormigón que presenta un mayor crecimiento fue el RAC60, seguido del RAC100 y por último el RAC40.

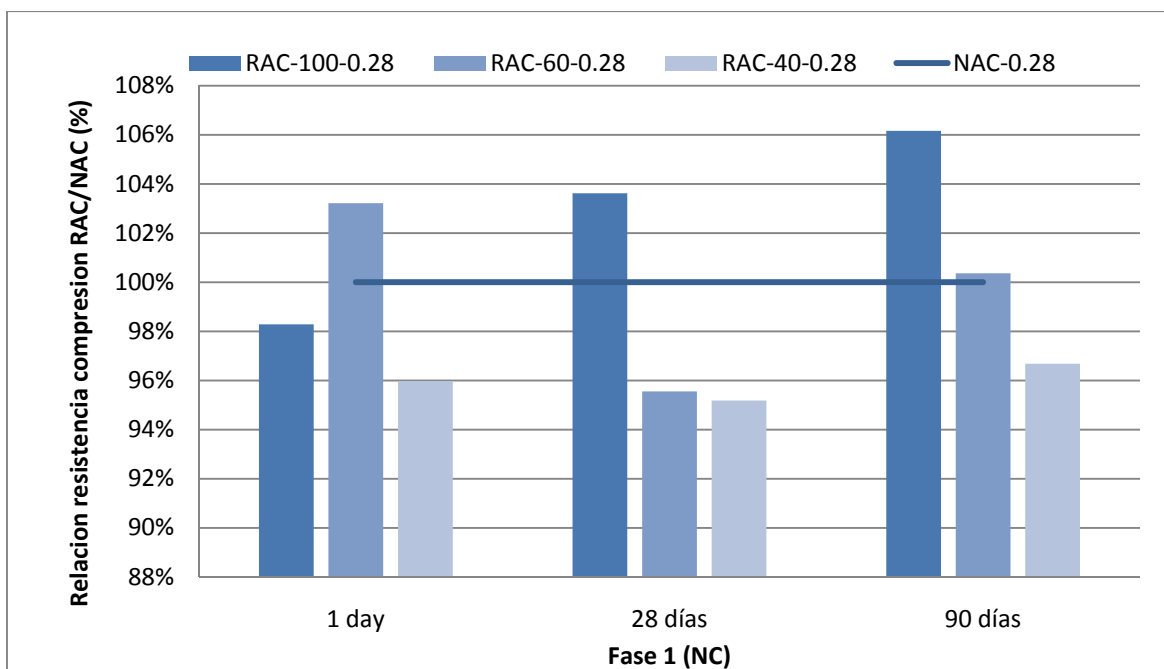


Figura 4:2 Variación de la resistencia a compresión respecto al hormigón de referencia, para diferentes edades del hormigón.

En la figura 4:2, obtenemos la relación de la resistencia a compresión de cada uno de los tipos de hormigón respecto al hormigón de referencia para cada una de las edades del estudio. Podemos observar que durante las primeras 24 horas, el único hormigón que supera al NAC es el RAC100 con un 3% debido a su gran calidad del árido.

Llegados a los 28 días, el RAC100 obtienen los mejores resultados siendo este superior al hormigón de referencia. El resto de hormigones reciclados obtienen un incremento menor y similar de su resistencia comparado con el incremento obtenido a los 28 días por el RAC.

Para los hormigones con una edad de 90 días, respecto al hormigón convencional durante las primeras 24 horas, se obtiene unos mayores incrementos de resistencia para los hormigones de 100 y 60 MPa, y el RAC40 obtiene un incremento final menor al convencional.

Observamos que para los 90 días es cuando los hormigones sufren una mayor evolución respecto el hormigón convencional y los otros ensayos a distintas edades, siendo el hormigón con un árido reciclado de 40 MPa el que sufre menor aumento.

Fase 2

Tabla 4:2 Resistencia a compresión (NC), fase 2, 24 horas, 28 y 90 días.

Hormigón	24h (Mpa)	28 días (Mpa)	90 días (Mpa)
1NAC	43,50	77,02	84,7
1RAC100	41,83	77,31	87,76
1RAC40	35,08	68,64	75,23

En la **fase 2**, como ya se comentó anteriormente, por problemas de stock no fue posible la fabricación del hormigón reciclado de 60 MPa. Durante esta fase se fabricó hormigón de 60 MPa para después poder procesarlo y utilizarlo en la fabricación de la fase 3.

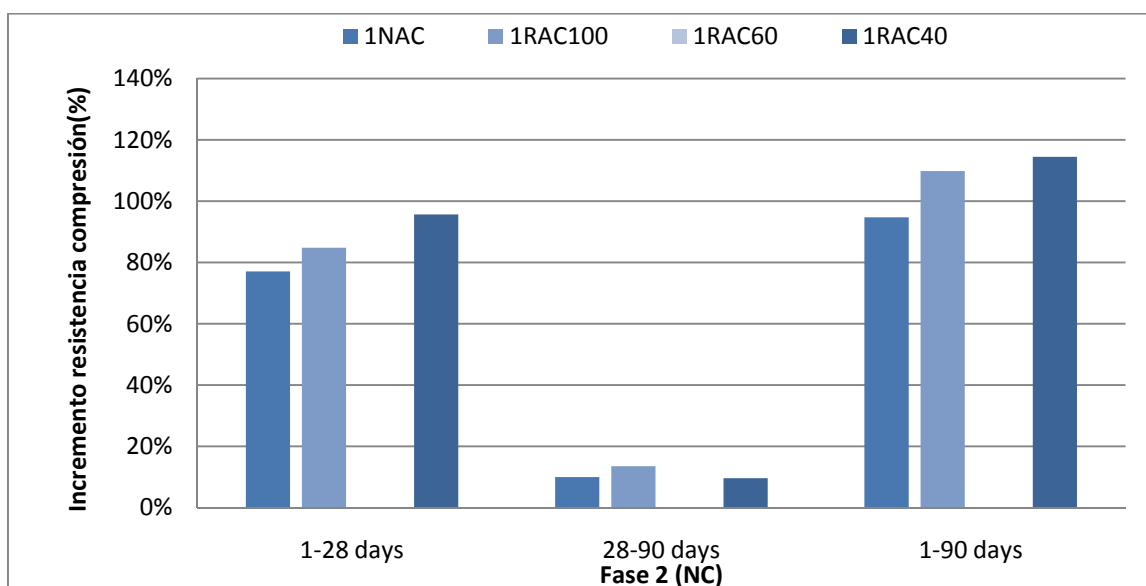


Figura 4:3 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.

De los resultados obtenidos en la fase 2 se puede observar como durante las primeras 24h, ninguno de los hormigones con árido reciclado supera al hormigón de referencia.

En los resultados obtenidos a los 28 días, el hormigón que obtuvo un mayor incremento de su resistencia respecto al de referencia fue el 1RAC40 con un valor del 16% superior al NAC. El hormigón convencional fue el que obtuvo el menor incremento de resistencia durante esta etapa.

Transcurridos los 90 días, el hormigón que alcanzo el mayor incremento fue el 1RAC40 seguido del 1RAC100. El hormigón convencional obtuvo los peores resultados respecto al incremento de resistencia a compresión.

En la *figura 4:4* podemos ver los resultados obtenidos a las 24 horas, durante los 28 y 90 días. En la gráfica, el hormigón convencional representa el 100% de la resistencia en cada una de

sus fases y se puede observar la variación de la resistencia respecto este en cada una de las etapas.

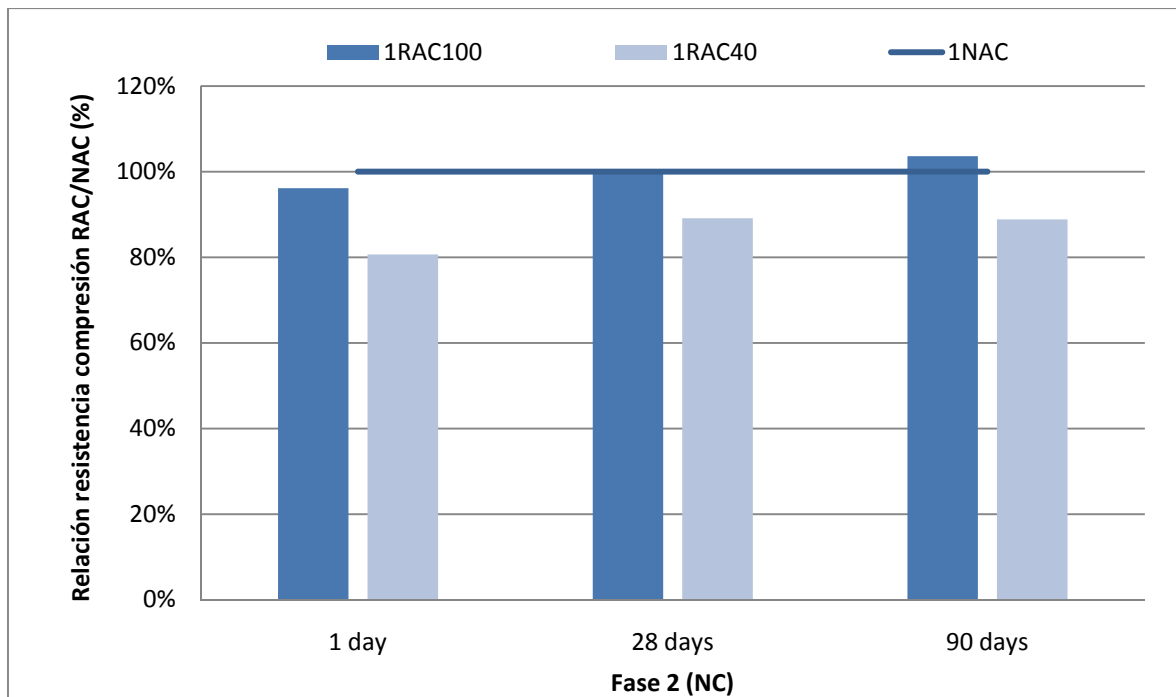


Figura 4:4 Variación de la resistencia a compresión respecto al hormigón de referencia, para diferentes edades del hormigón.

En las primeras 24 horas, podemos observar que todos los hormigones fabricados en la fase 2 obtienen peores resultados que el hormigón de referencia, y de todos ellos, el que mas se acerca al de referencia es el 1RAC100.

A los 28 días de edad, el hormigón convencional y el de 100 MPa obtienen una variación de su resistencia similar, siendo el hormigón con el árido de peor calidad el que obtiene peores resultados.

Por último, si estudiamos la evolución de las resistencias de los hormigones a los 90 días, todos los hormigones sufren un mayor incremento de la variación de resistencia respecto al convencional, siendo el 1RAC100 el que obtiene un valor superior al resto y EL 1RAC40 apenas sufre variación si comparamos los 28 y los 90 días.

Fase 3

Tabla 4:3 Resistencia a compresión (NC), fase 3, 24 horas, 28 y 90 días.

Hormigón	24h (Mpa)	28 días (Mpa)	90 días (Mpa)
2NAC	46,64	74,44	-
2RAC100	48,89	75,91	-
2RAC60	44,43	65,40	-
2RAC40	44,20	67,33	-

De los resultados obtenidos en la **fase 3** se puede observar como durante las primeras 24h, solo el RAC100 es el único que supera en resistencia al hormigón de referencia o convencional (NAC).

En los resultados obtenidos a los 28 días, el hormigón que obtuvo una mayor resistencia respecto al de referencia fue el RAC100 con un valor del 1,97% superior al NAC. En cambio, el hormigón RAC40 obtuvo el peor valor, un 5,23% inferior que el hormigón de referencia.

Debido a que esta fase 3 del estudio se determinó con el tiempo justo, los resultados de la resistencia a compresión de las probetas a 90 días se obtendrán en Julio y podrán ser expuestos delante del tribunal evaluador de la tesina.

En la *figura 4:5* podemos ver únicamente los resultados obtenidos a los 28 días, debido al problema expuesto anteriormente.

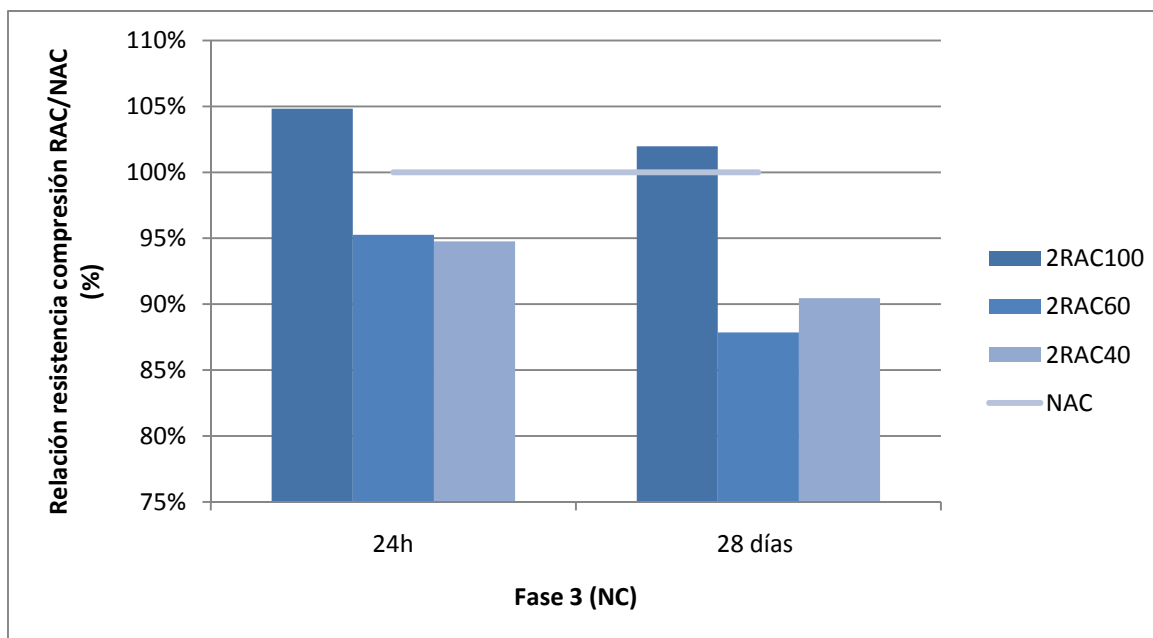


Figura 4:5 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.

Donde podemos observar como los incrementos de las resistencias a compresión durante las primeras 24h son similares en los áridos de peor calidad e inferiores al obtenido en el hormigón de referencia, exceptuando el 2RAC100.

A 28 días, como sucede en las primeras 24 horas, solo el 2RAC100 supera al hormigón de referencia y los otros 2 restantes ven aumentada ligeramente su resistencia respecto al hormigón convencional.

Si comparamos los resultados de las resistencias a compresión de los hormigones en las distintas fases, podemos observar como a medida que hemos aumentado la relación a/c (fase 2) y el tamaño máximo del árido reciclado (fase 3), las resistencias a compresión de estos han disminuido tal como estudio Limbachiya [25].

Podemos observar como el árido de peor calidad, en la fase 1 tiene una evolución de su resistencia a compresión parecida al hormigón de referencia alcanzado unas resistencias similares a la edad de 90 días. Al aumentar la relación a/c y el tamaño máximo del árido, la evolución de sus resistencias y el valor final es menor respecto la fase 1.

4.2.2 Resistencia a tracción indirecta

Se utilizaron probetas cilíndricas 20x10cm y se ensayaron para la edad de 28 días. Los valores obtenidos en la *tabla 4:4* son el promedio de las probetas ensayadas.

Tabla 4:4 Resistencia a tracción indirecta (NC), fase 1, 2 y 3, 28 días.

Hormigón	28 días (Mpa)	Hormigón	28 días (Mpa)	Hormigón	28 días (Mpa)
NAC	5,36	1NAC	5,22	2NAC	3,77
RAC100	6,15	1RAC100	4,52	2RAC100	4,15
RAC60	4,16	1RAC60	-	2RAC60	4,34
RAC40	4,34	1RAC40	4,32	2RAC40	3,72

Fase 1

El hormigón convencional alcanza unas resistencias a tracción mayores que el resto de hormigones reciclados, exceptuando el RAC100 que obtuvo una resistencia con un valor de un 14,73% superior al valor de referencia.

Fase 2

El hormigón convencional alcanza unas resistencias a tracción mayores que el resto de hormigones reciclados. El 1RAC40 obtuvo la menor resistencia a tracción, siendo esta un 17,24% menor que la del hormigón de referencia.

Fase 3

El hormigón de referencia tiene un valor bastante parecido al 2RAC40, y estos dos han sido superados por el 2RAC100 y el 2RAC60, siendo este último el que obtuvo una mayor resistencia a tracción respecto del convencional, exactamente un 15,12%.

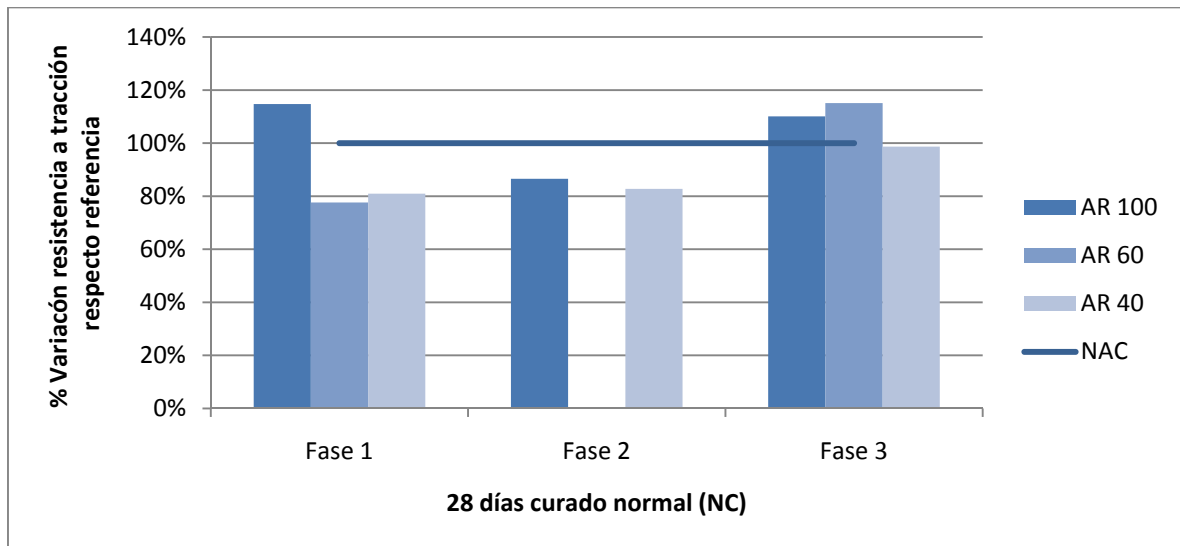


Figura 4:6 Variación resistencia a tracción respecto al hormigón de referencia.

Podemos observar que al aumentar la relación a/c durante la fase 2, disminuimos las resistencias a tracción del hormigón de referencia y del RAC100, sin embargo el RAC40 apenas noto cambios.

Al pasar a la fase 3, manteniendo la misma relación a/c y aumentando el tamaño máximo de los áridos, todos los hormigones con árido reciclado vieron aumentadas sus resistencias exceptuado el 2RAC40, donde su relación con el de referencia se vio aumentada pero aun así su resistencia a tracción fue menor que el hormigón convencional.

Durante la fase 2, el hormigón que evoluciona mejor respecto al convencional es el 1RAC100 y los hormigones reciclados sufren una evolución similar. Sin embargo si comparamos los hormigones de la fase 3, podemos ver que respecto la primera fase, todos sufren una evolución parecida de sus resistencias al incrementar la relación a/c y el tamaño máximo del árido.

Para la fase 1 y 2, el hormigón de referencia y el fabricado con arido reciclado de 100 MPa obtuvieron buenos resultados. Según Etxeberria et al [33], la tracción indirecta no se ve afectada por el porcentaje de sustitución de árido, probablemente la influencia del ITZ entre la pasta de cemento y los agregados.

4.2.3 Módulo de elasticidad

El modulo se obtuvo a la edad de 28 días mediante el ensayo de probetas cilíndricas de 20x10cm. En la *tabla 4:5* se muestran los resultados.

Tabla 4:5 Módulo de elasticidad (GPa), fase 1, 2 y 3, 28 días (NC).					
Hormigón	28 días (GPa)	Hormigón	28 días (GPa)	Hormigón	28 días (GPa)
NAC	46,39	1NAC	41,07	2NAC	42,03
RAC100	44,75	1RAC100	36,40	2RAC100	36,71
RAC60	41,65	1RAC60	-	2RAC60	29,89
RAC40	38,42	1RAC40	34,69	2RAC40	27,12

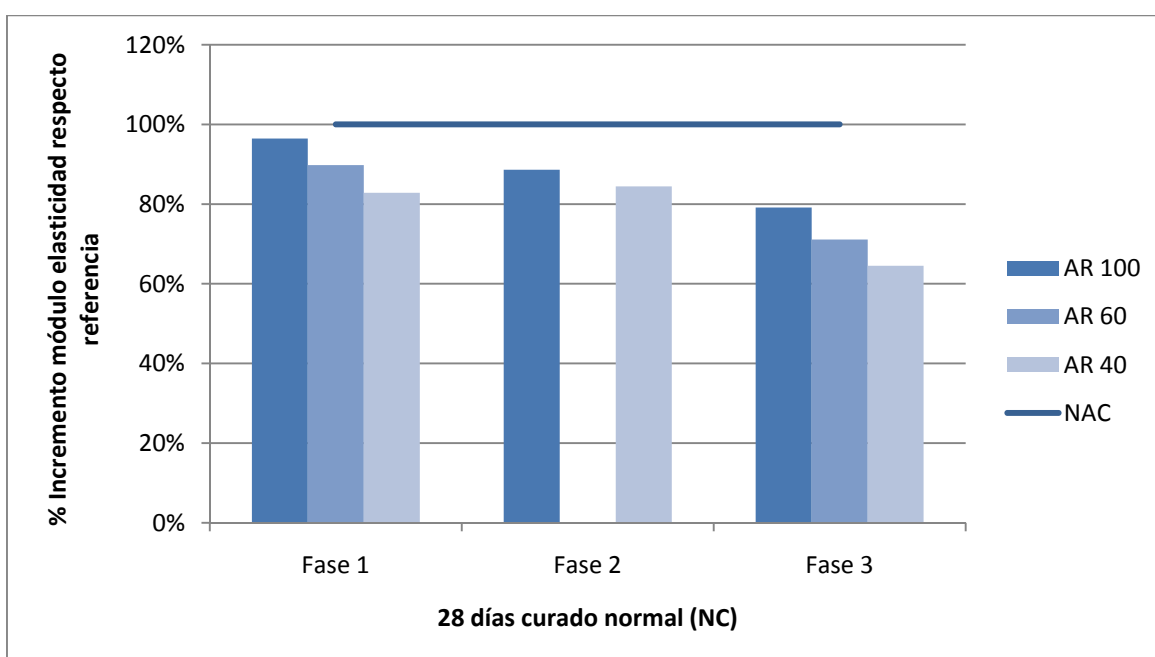


Figura 4:7 Variación del módulo elasticidad respecto al hormigón de referencia.

Debido a la porosidad de los áridos reciclados y que estos son más propensos a deformarse, podemos observar cómo se produce una disminución en el módulo [4], siendo el hormigón de referencia en las 3 fases el que mayor valor a obtenido.

También podemos observar como para áridos de peor calidad, su módulo elástico es menor y, a medida que aumentamos la relación agua/cemento y el tamaño máximo del árido, el modulo elástico en cada uno de los hormigones disminuye.

En la *figura 4.7*, durante la fase 2 vemos que el hormigón de referencia y el que tiene el árido reciclado de mejor calidad sufren una variación muy similar de su módulo, sin embargo el de 40 MPa no queda muy alejado de ellos. Pero al aumentar el tamaño máximo del árido, todos los hormigones reciclados sufren una disminución de su incremento de resistencia respecto al convencional, siendo los áridos de 60 y 40 MPa los más perjudicados.

4.3 Ensayos físicos

4.3.1 Densidad, absorción y poros accesibles

Estas características se determinaron a los 28 días de edad en probetas cubicas de 10x10cm. Los resultados se muestran en las *tablas 4:6, 4:7 y 4:8*.

Fase 1

Tabla 4:6 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 1 (NC).

Hormigón	Densidad seca (kg/m3)	Absorción (%)	Volumen de poros (%)
NAC	2,43	2,74	6,67
RAC100	2,37	3,5	8,29
RAC60	2,34	3,76	8,79
RAC40	2,33	3,88	9,03

Debido a que los áridos reciclados tienen una porosidad mayor, la densidad del hormigón reciclado es menor que el de referencia. El árido de 40MPa al ser el más poroso es por tanto el que tiene una menor densidad y una mayor absorción.

Fase 2

Tabla 4:7 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 2 (NC).

Hormigón	Densidad seca (kg/m3)	Absorción (%)	Volumen de poros (%)
1NAC	2,39	3,46	8,26
1RAC100	2,31	4,24	9,78
1RAC40	2,24	5,26	11,79

Ocurre exactamente lo mismo que en la fase 1, el RAC40 al ser el árido más poroso es el que tiene menor densidad seca i mayor absorción.

Fase 3

Tabla 4:8 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 3 (NC).

Hormigón	Densidad seca (kg/m3)	Absorción (%)	Volumen de poros (%)
2NAC	2,37	3,69	8,70
2RAC100	2,28	4,77	10,86
2RAC60	2,22	6,12	13,53
2RAC40	2,20	6,24	13,58

La misma situación que en la fase 1 y 2 del estudio.

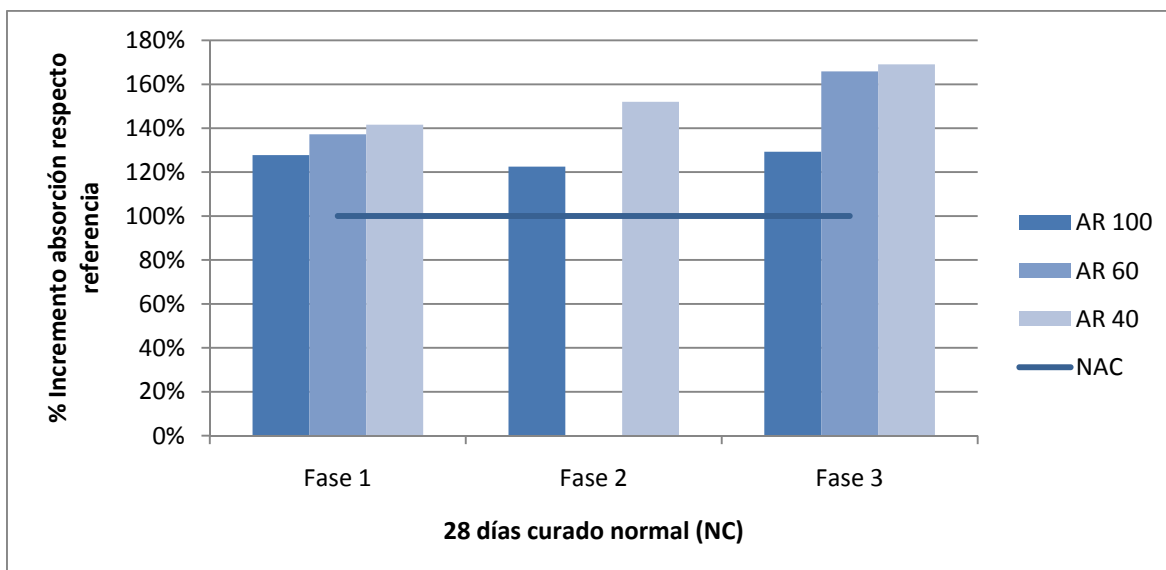


Figura 4:8 Variación de la absorción respecto al hormigón de referencia.

Analizando las 3 fases podemos constatar que a medida que hemos aumentado la cantidad de agua en la dosificación (relación a/c), el volumen de poros y la absorción han aumentado en cada una de las muestras y la densidad seca ha disminuido. Al aumentar el tamaño máximo del árido ha ocurrido exactamente lo mismo.

En la *figura 4.8*, se puede constatar como al pasar a la fase 2 y 3, los incrementos de absorción en los hormigones de peor calidad aumentan considerablemente debido a que estos son más porosos.

4.4 Ensayos del hormigón endurecido (NC), Durabilidad

En el siguiente apartado se hará un estudio de los valores obtenidos por los ensayos de densidad, succión capilar, UPC y resistencia a la penetración de cloruros.

4.4.1 Succión capilar

Los coeficientes de succión determinados durante las 6 primeras horas para cada tipología de hormigón se encuentran en la *tabla 4:9* y las probetas fueron ensayadas a los 28 días.

Fase 1

Tabla 4:9 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 1, edad de 28 días (NC).

Hormigón	Coeficiente de succión ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$)
NAC	0,011
RAC100	0,010
RAC60	0,013
RAC40	0,014

La única dosificación que presento un coeficiente de succión menor al hormigón de referencia es el RAC100 y se debe a que tiene una mejor interfase (ITZ). El resto de hormigones, al tener una mayor absorción, obtuvieron un coeficiente de succión mayor al de referencia. Infiuye mucho la calidad del árido, ya que a peor calidad mayor será la succión experimentada por el hormigón.

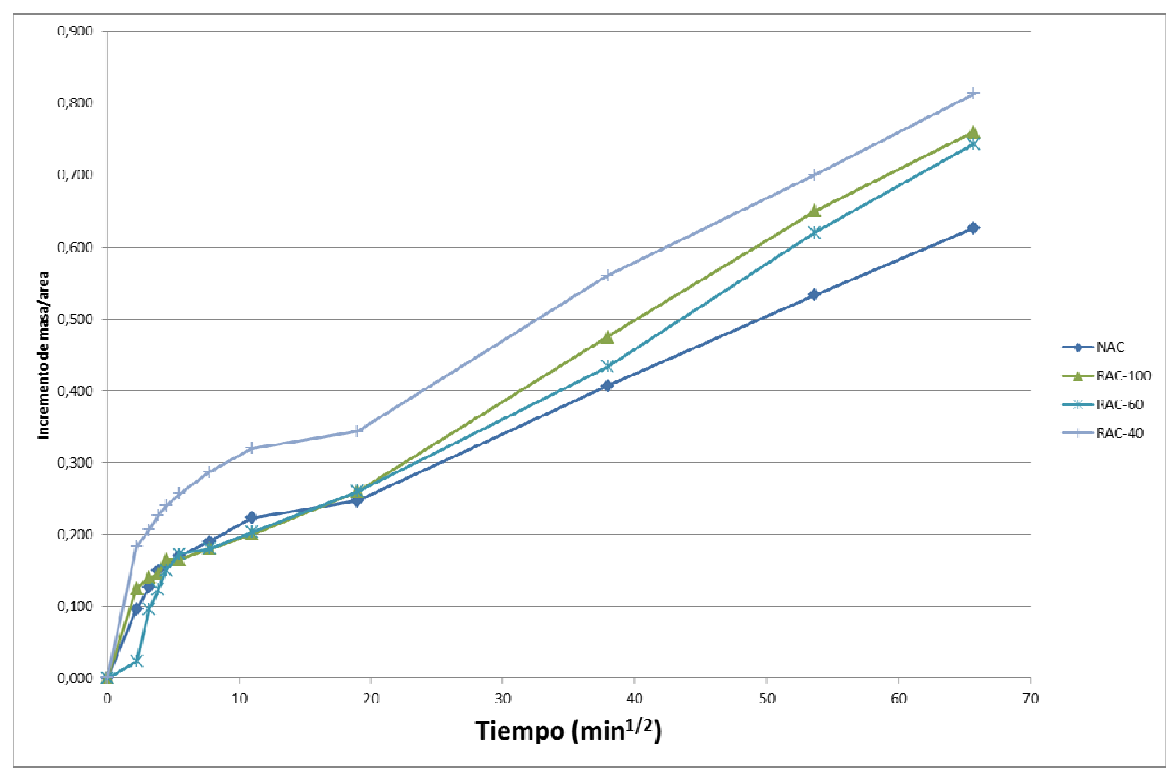


Figura 4:9 Absorción capilar (mm), para 28 días.

Se puede apreciar que en las primeras horas la absorción creció de manera lineal hasta que poco a poco se fue estabilizando. El hormigón que presento una mayor absorción es el RAC40 debido a la baja calidad de su árido, y el RAC60 y RAC100 obtuvieron un resultado similar.

Fase 2

Tabla 4:10 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 2, edad de 28 días (NC).

Hormigón	Coeficiente de succión (mm/min ^{0.5})
1NAC	0,019
1RAC100	0,020
1RAC40	0,030

Todas las dosificaciones quedaran por encima del hormigón de referencia aunque el resultado del 1RAC100 es similar al del convencional.

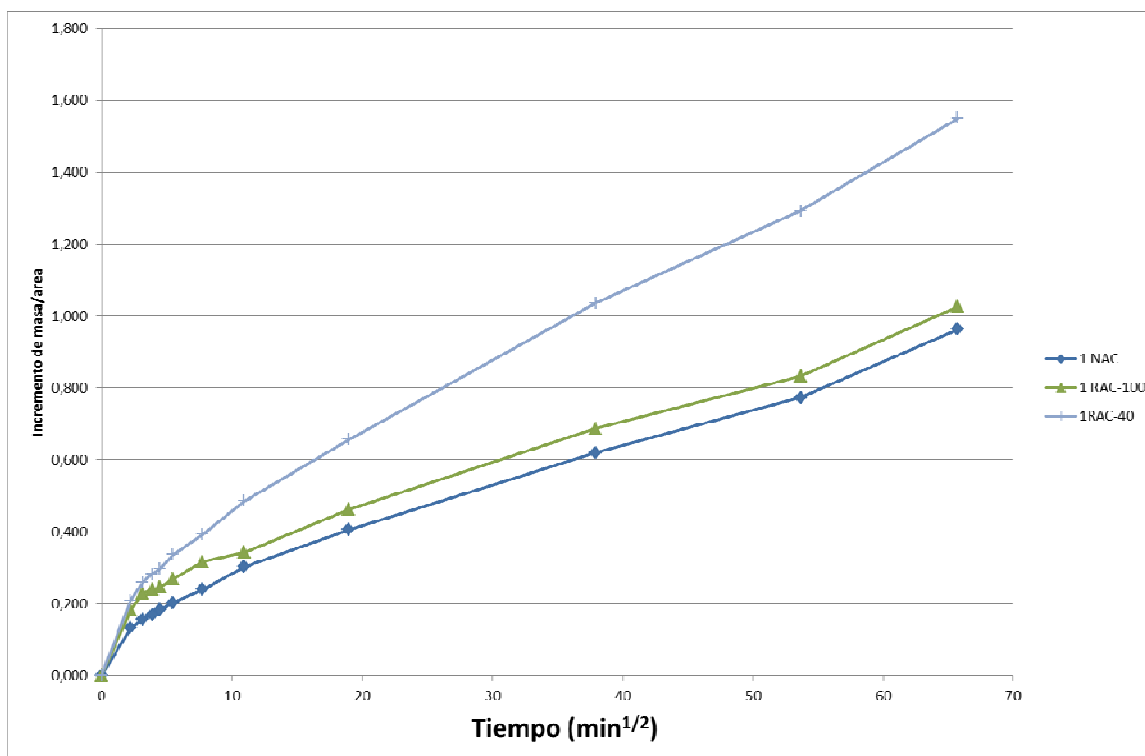


Figura 4:10 Absorción capilar (mm), para 28 días.

Las diferentes tipologías durante las primeras horas tienen un comportamiento similar, pero a la larga, el 1RAC100 y el hormigón de referencia tienen resultados similares mientras que el 1RAC40 obtiene un valor bastante elevado en comparación.

Fase 3

Tabla 4:11 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 3, edad de 28 días (NC).

Hormigón	Coeficiente de succión (mm/min ^{0.5})
2NAC	0,020
2RAC100	0,018
2RAC60	0,027
2RAC40	0,027

Los resultados obtenidos para el 2RAC100 son similares al hormigón convencional, sin embargo el resto tienen una mayor capacidad de absorción debido a la peor calidad del árido reciclado.

En la *figura 4:11* volvemos a ver un crecimiento lineal donde al final coinciden los valores de la absorción por parte del 2RAC60 y 2RAC40 debido a la mala calidad del árido.

Si nos fijamos en las 3 fases, se puede llegar a la conclusión de que a medida que aumentamos la cantidad de agua (relación a/c) obtenemos una mayor absorción en todas las tipologías de hormigón, pero en el caso de aumentar el tamaño del árido, la absorción capilar para los hormigones con árido reciclado disminuye.

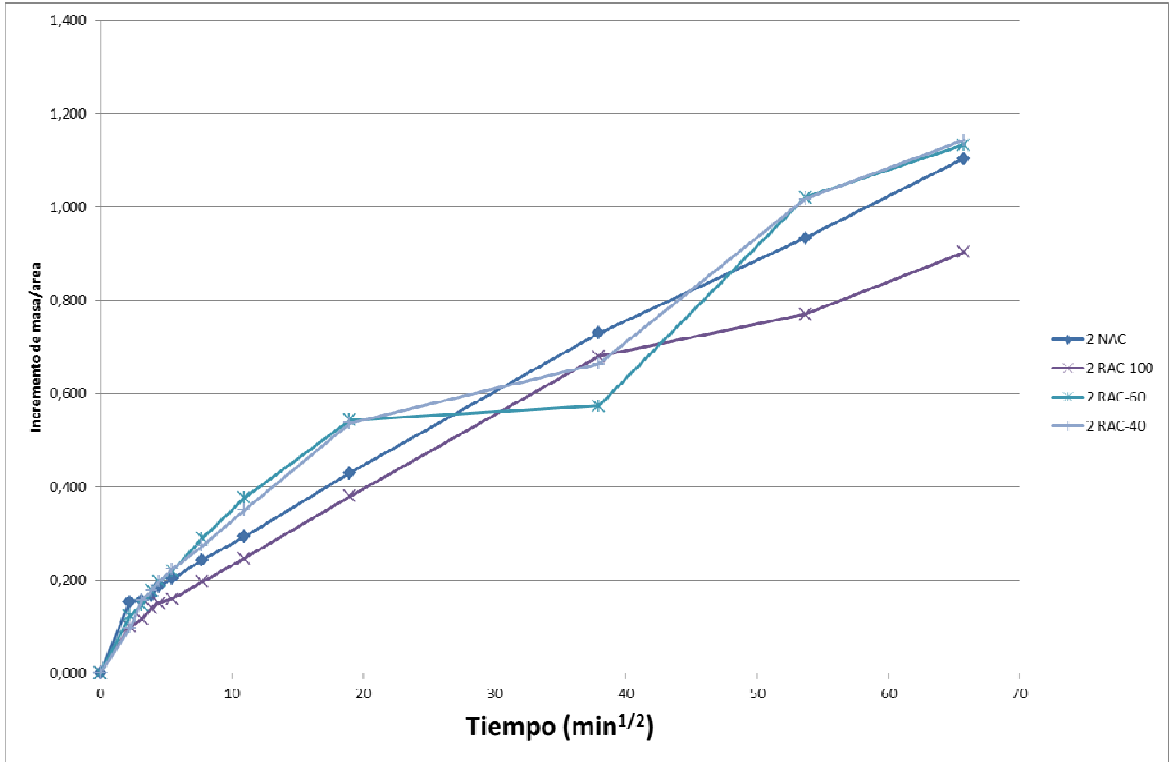


Figura 4:11 Absorción capilar, para 28 días.

4.4.2 UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

A la edad de 28 días, una vez se han saturado las probetas cubicas de 10x10cm, se realiza el ensayo de UPV descrito anteriormente. Para saber si los resultados son buenos podemos utilizar la *tabla 4:12* descrita por Whitehurts [32].

Tabla 4:12 Rango de valores, velocidad UPV.

Calidad	Velocidad UPV (m/s)
Excelente	4500
Buena	4500-3500
Dudosa	3500-3000
Pobre	3000-2000

En la *tabla 4:13* se encuentran los resultados del ensayo.

Fase 1, 2 y 3

Tabla 4:13 Resultados UPV, fase 1,2 y 3, edad de 28 días (NC).

Hormigón	Velocidad (m/s) 28d	Hormigón	Velocidad (m/s) 28d	Hormigón	Velocidad (m/s) 28d
NAC	5217	1NAC	4967	2NAC	5053
RAC100	4959	1RAC100	4670	2RAC100	4695
RAC60	4634	1RAC60	-	2RAC60	4439
RAC40	4655	1RAC40	4566	2RAC40	4316

Podemos observar que en la 1 y 2 fase todos los hormigones tienen una excelente calidad si lo comparamos con la tabla propuesta por Whitehurts. Sin embargo, en la fase 3, solo el hormigón de referencia y el que tiene el árido reciclado de mayor calidad (2RAC100) mantienen la misma calidad respecto las anteriores fases. El resto pasa de excelente a una buena calidad.

El hecho de aumentar la relación a/c y el máximo tamaño de árido utilizado nos permite observar como en cada fase, la calidad del hormigón va disminuyendo a medida que alteramos estos parámetros.

4.4.3 Resistencia a la penetración de los iones cloruros

El ensayo se realiza a la edad de 28 y 90 días, en la *tabla 4:14* se muestran los resultados obtenidos durante el estudio.

Fase 1

Tabla 4:14 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 1, 28 y 90 días (NC).

Hormigón	Total de carga 28d (Coulombs)	Hormigón	Total de carga 90d (Coulombs)
NAC	2016,5	NAC	969,8
RAC100	1724	RAC100	1462,5
RAC60	2462	RAC60	2023,2
RAC40	2304,5	RAC40	2282

El rango de valores del ensayo se muestra en la tabla del apartado de durabilidad donde quedan definidos los valores del riesgo de la penetración de cloruros.

Se observa que para una edad a 28 días, el hormigón con mayor resistencia a un ataque por cloruros es el RAC100 seguido por el hormigón de referencia. El RAC60 es el que se ve más afectado por un posible ataque.

A los 90 días, las resistencias contra los ataques de cloruros aumentan en todos los hormigones, siendo el NAC el más resistente debido a que su composición la forman áridos naturales, y el RAC-40 el más vulnerable de ellos.

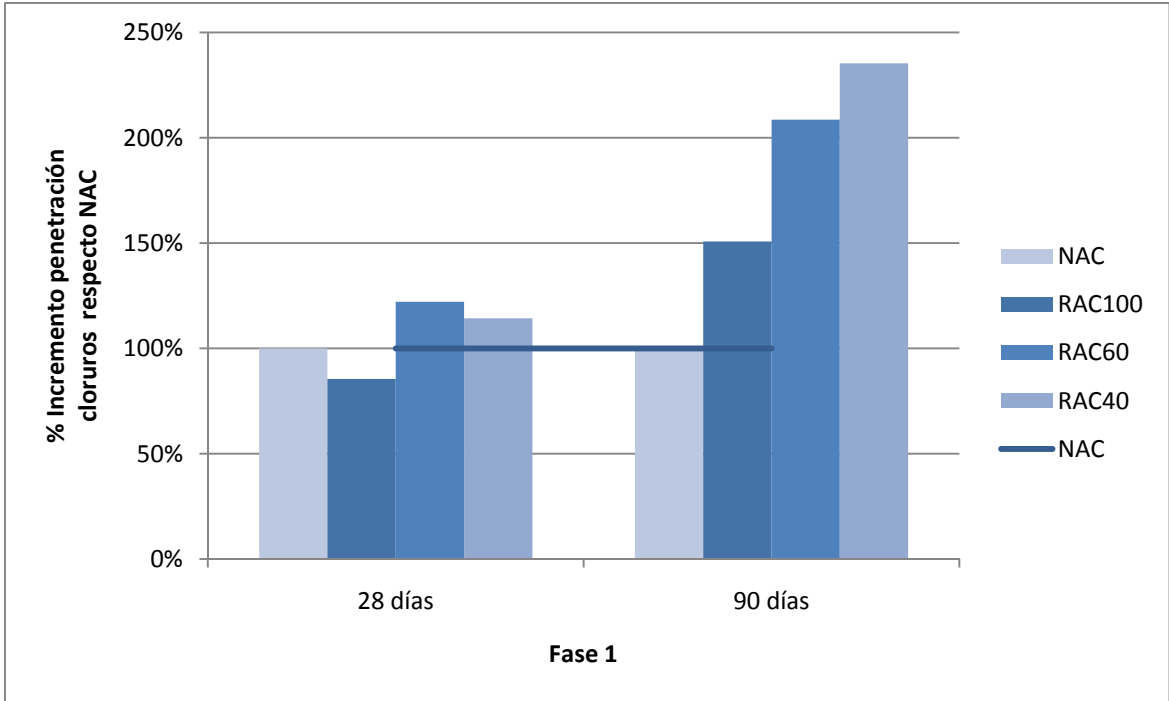


Figura 4:12 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para las edades de 28 y 90 días.

En la fase 1, ¡los hormigones reciclados respecto el hormigón de referencia obtienen un incremento de resistencia superior a la edad de 90 días respecto al de referencia, que en los 28 días. Esto es debido a que a medida que aumenta la edad del hormigón, su estructura porosa se vuelve más resistente a los ataques de los cloruros.

Fase 2

Tabla 4:15 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 2, 28 y 90 días (NC).

Hormigón	Total de carga 28d (Coulombs)	Hormigón	Total de carga 28d (Coulombs)
1NAC	2677,5	1NAC	1736,1
1RAC100	2727,0	1RAC100	2504,3
1RAC60	-	1RAC60	-
1RAC40	4039,2	1RAC40	4194,9

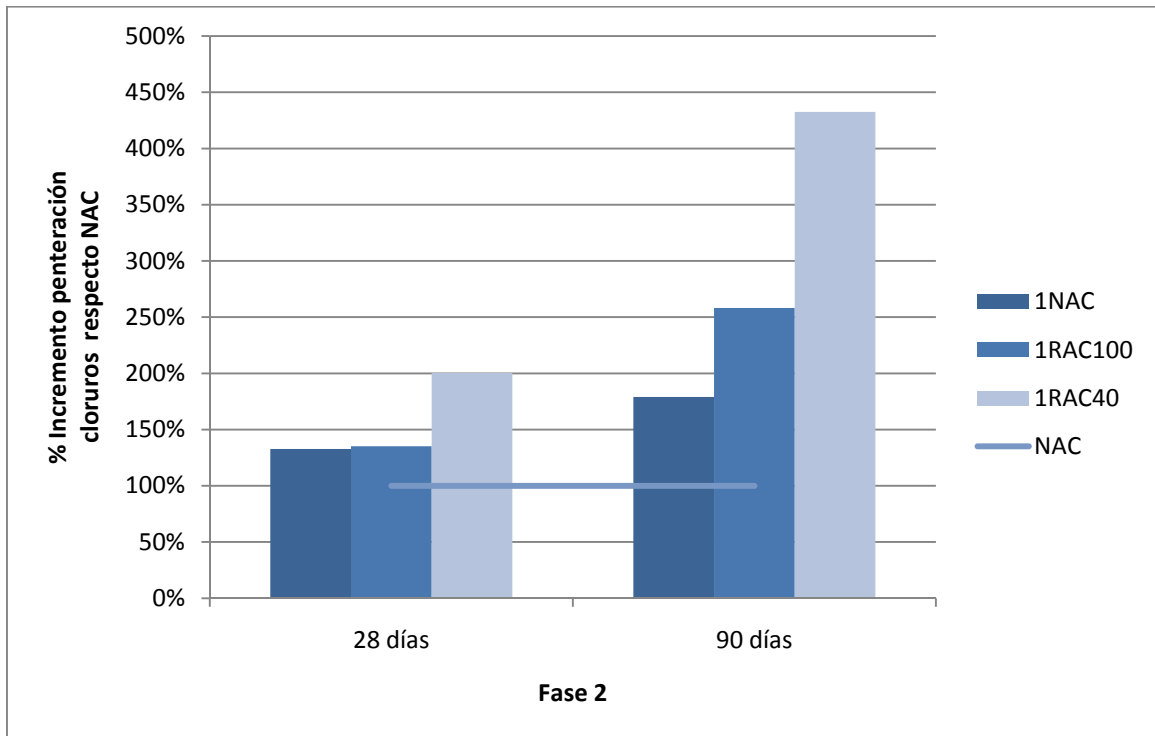


Figura 4:13 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para las edades de 28 y 90 días.

A los 28 días, el hormigón de referencia y el 1RAC100 tienen unos valores similares pero en cambio el 1RAC40, su valor es muy elevado respecto al resto debido a la mala calidad de su árido reciclado.

Transcurridos 90 días, el hormigón de referencia y 1RAC100 aumentan sus resistencias contra los ataques a cloruros, siendo el 1RAC100 el más resistente. Sin embargo, el 1RAC40 sigue con un valor similar al obtenido a la edad de 28 días.

Podemos observar como durante los 28 y 90 días, en la fase 2 al aumentar la cantidad de agua, todos los hormigones son más débiles a los ataques de los cloruros, donde los más afectados y que tienen más variaciones de su resistencia son los hormigones con el árido de peor calidad (40 MPa).

Fase 3

Tabla 4:16 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 3, 28 días (NC).

Hormigón	Total de carga 28d (Coulombs)
1NAC	2511,4
1RAC100	3040,2
1RAC60	4526,5
1RAC40	6427,3

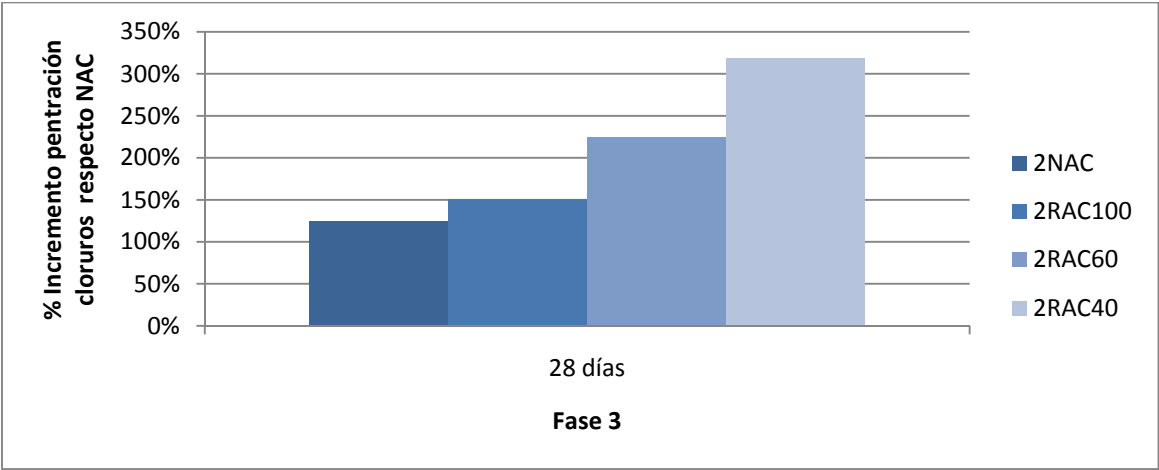


Figura 4:14 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para la edad de 28 días.

A los 28 días, el hormigón más resistente a los ataques es el de referencia y a medida que la calidad del árido disminuye, podemos ver en la gráfica como su resistencia es menor.

Si observamos detalladamente las 3 fases, podemos llegar a la conclusión de que a medida que aumentamos la relación a/c y el tamaño máximo del árido, los hormigones pierden resistencia contra los ataques de cloruros debido a que estos ganan una mayor porosidad.

5 Resultados Fase experimental curado al vapor (SC)

5.1 Introducción

Igual que en el anterior apartado, se analizarán los resultados obtenidos para el caso de curado al vapor en las primeras 24 horas. Analizando los resultados determinaremos las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad de los diferentes tipos de hormigones.

5.2 Ensayos del hormigón endurecido (SC), Propiedades mecánicas

5.2.1 Resistencia a compresión simple

La resistencia a compresión se determinó para las edades de 1, 28 y 90 días, en las probetas de hormigón con un curado al vapor en las primeras 24 horas. En la *tabla 5:1* se muestran los resultados obtenidos en cada una de las fases del ensayo experimental.

Fase 1

Tabla 5:1 Resistencia a compresión (SC), fase 1, 24 horas, 28 y 90 días.

Hormigón	24h (Mpa)	28 días (Mpa)	90 días (Mpa)
NAC-SC	64,58	80,03	83
RAC100-SC	69,46	84,4	94,98
RAC60-SC	67,22	76,91	87,32
RAC40-SC	67,65	78,07	82,48

De los resultados obtenidos en la **fase 1** se puede observar como durante las primeras 24h, todos los hormigones con árido reciclado superan al hormigón de referencia (NAC-SC).

En los resultados obtenidos a los 28 días, el hormigón que obtuvo una mayor resistencia respecto al de referencia fue el RAC100-SC con un valor del 5,46% superior al NAC-SC. En cambio, el hormigón RAC60-SC obtuvo el peor valor, un 4% inferior que el hormigón de referencia.

Transcurridos los 90 días, el hormigón que alcanzó la mayor resistencia fue el RAC100-SC con un valor del 14,43% superior al hormigón de referencia. El RAC40 fue el único que quedó por debajo del hormigón convencional, un 0,6% inferior al NAC-SC.

En la *figura 5.1*, podemos ver los resultados obtenidos a los 28 días, durante los 28 y 90 días y finalmente a los 90 días. En esta, el hormigón convencional representa el 100% de la resistencia que se ha alcanzado y se pueden observar los distintos valores que se encuentran por encima o debajo del valor de referencia

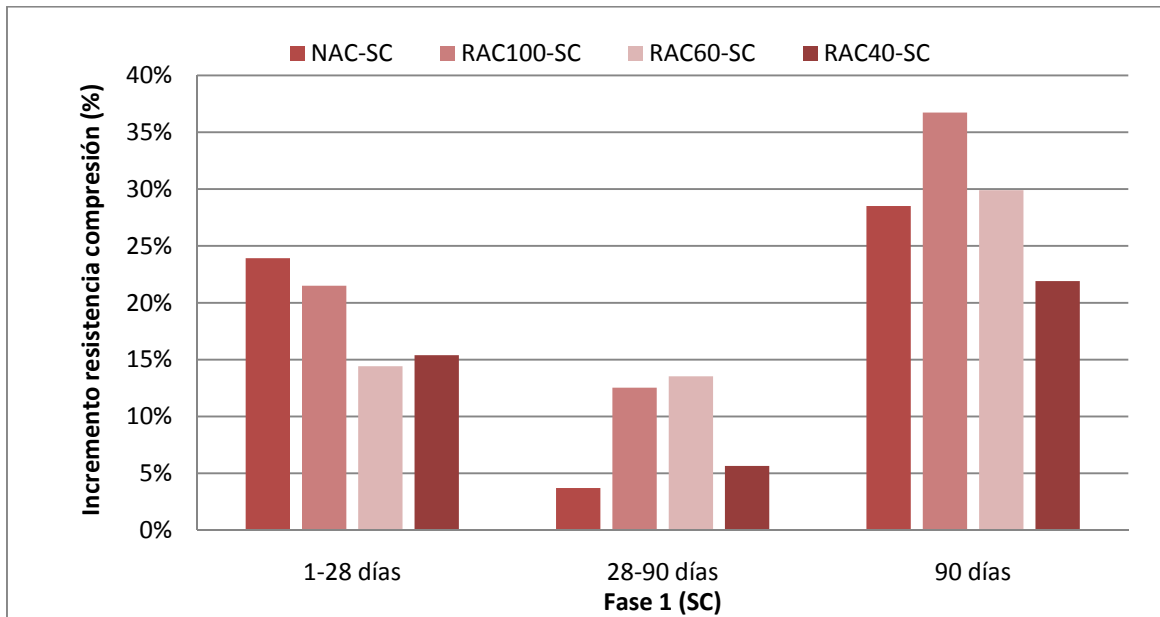


Figura 5:1 Variación de la resistencia a compresión respecto al hormigón de referencia, para diferentes edades del hormigón.

En los primeros 28 días podemos observar que el NAC-SC es el hormigón que su resistencia incrementa más respecto al resto de hormigones con áridos reciclados seguido del RAC100-SC, donde los hormigones con una peor calidad del árido sufren un aumento de sus resistencias similar.

A los 90 días de edad, el RAC100-SC es el hormigón que mejor evoluciona a medida que envejece respecto el de referencia y el RAC60-SC junto con el NAC-SC aumentan sus resistencias de forma parecida, siendo el primero ligeramente superior. El RAC40-SC debido a la mala calidad del árido apenas mejora su resistencia en comparación con el resto de hormigones.

Por último, si estudiamos la evolución de las resistencias de los hormigones desde los 28 a los 90 días, el hormigón que presentó un mayor crecimiento fue el RAC60-SC seguido del hormigón con árido reciclado de 100 MPa. Durante este periodo los hormigones reciclados obtuvieron un mayor incremento de sus resistencias respecto al hormigón convencional.

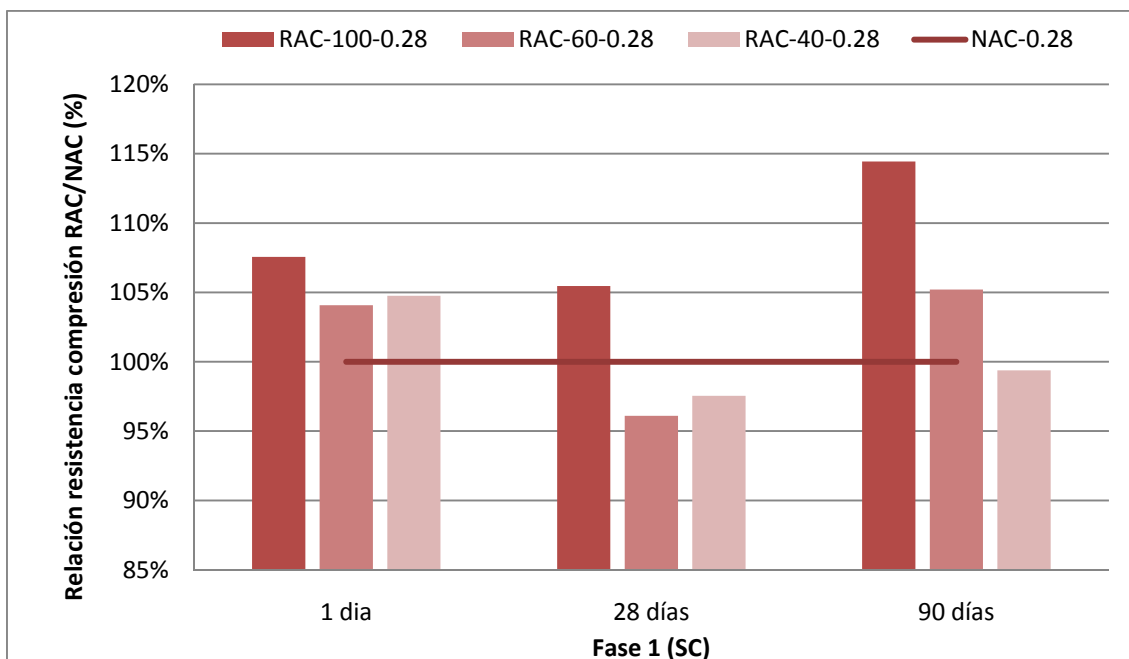


Figura 5:2 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.

Durante las primeras 24h se obtuvieron resultados muy parecidos en todos los hormigones, debido que al utilizar le curado a vapor, se ganaron mayores resistencias en todos los hormigones con árido reciclado.

Para la edad de 28 días, observamos que todos los hormigones evolucionan de forma similar, exceptuando el RAC100-SC que su incremento de resistencia es ligeramente superior al NAC-SC.

Finalmente, para la edad de 90 días, el hormigón convencional y el de 40 MPa tienen una evolución similar de sus resistencias y el resto es superior a ellos, siendo el RAC100-SC el que obtiene una mayor relación de resistencia a compresión comparando este con el NAC-SC.

Fase 2

Tabla 5:2 Resistencia a compresión (SC), fase 2, 24 horas, 28 y 90 días.

Hormigón	24h (Mpa)	28 días (Mpa)	90 días (Mpa)
1NAC-SC	52,81	69,27	73,61
1RAC100-SC	51,56	68,54	74,84
1RAC40-SC	48,14	60,38	64,84

En la **fase 2**, como ya se comentó anteriormente, por problemas de stock no fue posible la fabricación del hormigón reciclado de 60 MPa. Durante esta fase se fabricó hormigón de 60 MPa para después poder procesarlo y utilizarlo en la fabricación de la fase 3.

De los resultados obtenidos en la fase 2 se puede observar como durante las primeras 24h, ninguno de los hormigones con árido reciclado supera al hormigón de referencia.

En los resultados obtenidos a los 28 días, el hormigón sucede exactamente lo mismo que en la fase 1, los dos tipos de hormigones utilizados no llegan a alcanzar la resistencia del hormigón de referencia. El 1RAC40-SC obtuvo la peor resistencia, un 12,83% por debajo del de referencia.

Transcurridos los 90 días, el hormigón que alcanza la mayor resistencia fue el 1RAC100-SC con un valor del 1,67% superior al hormigón de referencia. El 1RAC40-SC quedo por debajo del hormigón convencional, un 11,91% inferior al 1NAC-SC.

En la figura 5.3, podemos ver los resultados obtenidos a los 28 días, durante los 28 y 90 días y finalmente a los 90 días. En la gráfica, el hormigón convencional representa el 100% de la resistencia que se ha alcanzado y se pueden observar los distintos valores que se encuentran por encima o debajo del valor de referencia.

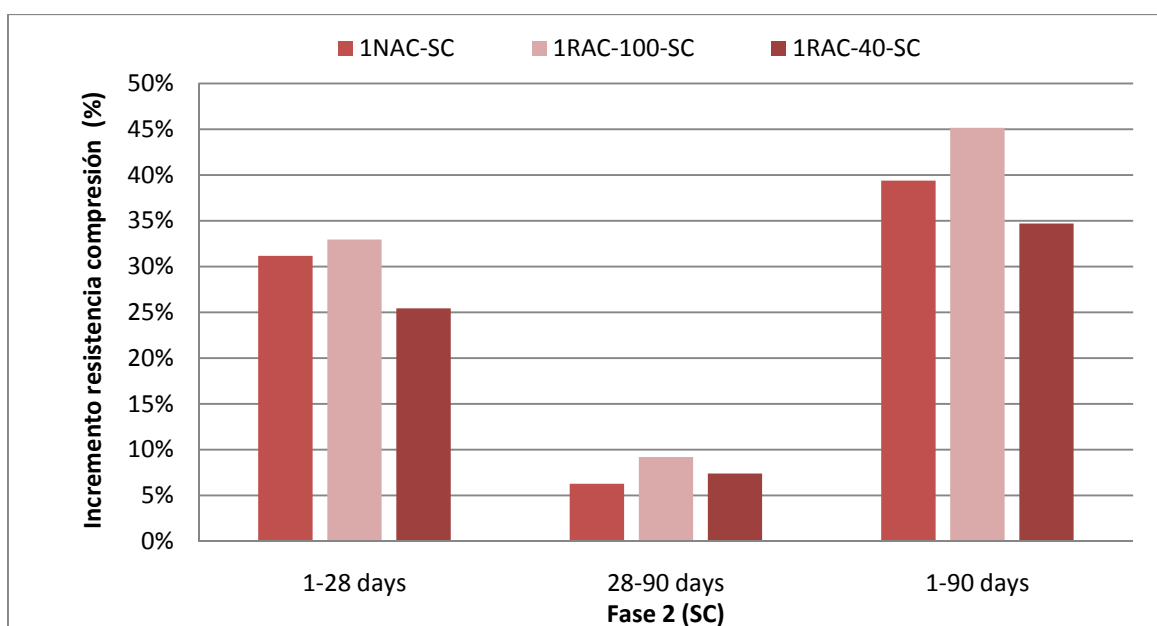


Figura 5:3 Variación de la resistencia a compresión respecto al hormigón de referencia, para diferentes edades del hormigón.

En los primeros 28 días podemos observar que el 1RAC100-SC es el hormigón que su resistencia incrementa más respecto al hormigón de referencia.

A los 90 días de edad surge una situación igual de parecida que a los 28 días, donde el 1RAC100-SC es el hormigón que sufre una mayor evolución de su resistencia pero sin embargo, en este caso sí que supera a la resistencia final del hormigón de referencia en un 1,67%.

Por último, si estudiamos la evolución de las resistencias de los hormigones desde los 28 a los 90 días, podemos observar como el hormigón que presento un mayor crecimiento fue el 1RAC100-SC seguido del 1RAC40-SC.

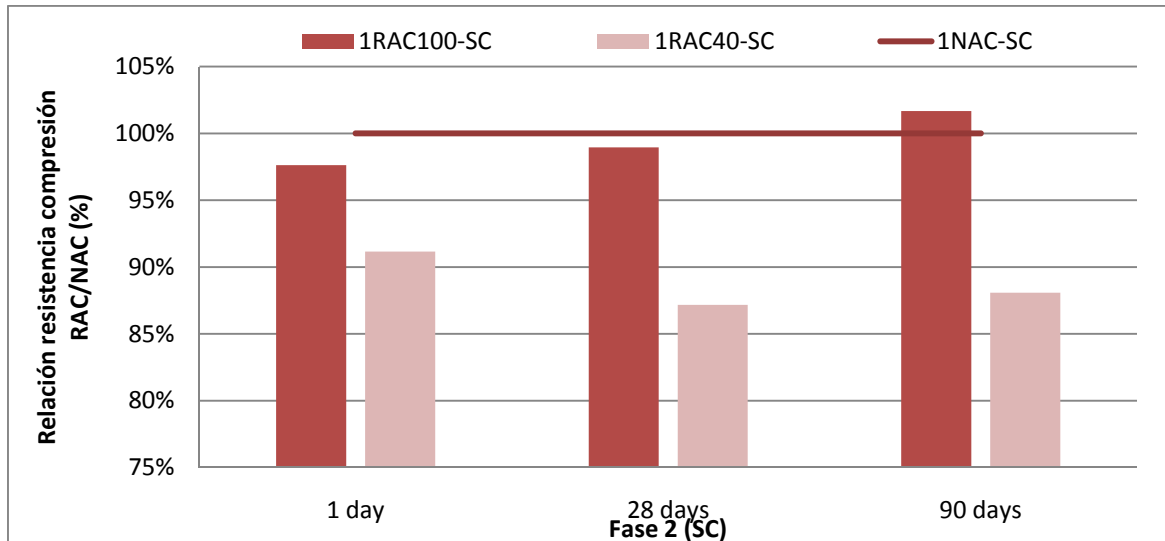


Figura 5:4 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.

En la figura 5.4, a las 24 h todos los hormigones tienen un incremento menor y parecido entre ellos respecto al hormigón de referencia en la fase 1 del estudio.

A los 28 días, el hormigón con árido de 100 MPa se acerca al de referencia. El 1RAC40-SC debido a su mala calidad sigue por debajo del NAC-SC.

Finalmente a los 90 días, RAC100-SC tiene un incremento de su resistencia superior al convencional y el de peor calidad sufre una evolución muy parecida a la de la fase 2.

Fase 3

Tabla 5:3 Resistencia a compresión (SC), fase 3, 24 horas, 28 y 90 días.

Hormigón	24h (Mpa)	28 días (Mpa)	90 días (Mpa)
2NAC-SC	50,44	63,44	-
2RAC100-SC	49,51	62,30	-
2RAC60-SC	46,80	54,48	-
2RAC40-SC	49,75	60,00	-

De los resultados obtenidos en la **fase 3** se puede observar como durante las primeras 24h, ninguno de los hormigones con árido reciclado supera en resistencia al hormigón de referencia (2NAC-SC).

En los resultados obtenidos a los 28 días, ocurre exactamente lo mismo que en las primeras 24 horas, ninguno de los hormigones llega a alcanzar al de referencia, siendo el 2RAC100-SC el que más se acerca a su resultado. El 2RAC60-SC obtiene la peor resistencia de todas, siendo esta un 14,12% peor.

Debido a que esta fase 3 del estudio se determinó con el tiempo justo, los resultados de la resistencia a compresión de las probetas a 90 días se obtendrán en Julio y podrán ser expuestos delante del tribunal evaluador de la tesina.

En la *figura 5.5*, podemos ver únicamente los resultados obtenidos en las primeras 24 horas y a los 28 días, debido al problema expuesto anteriormente

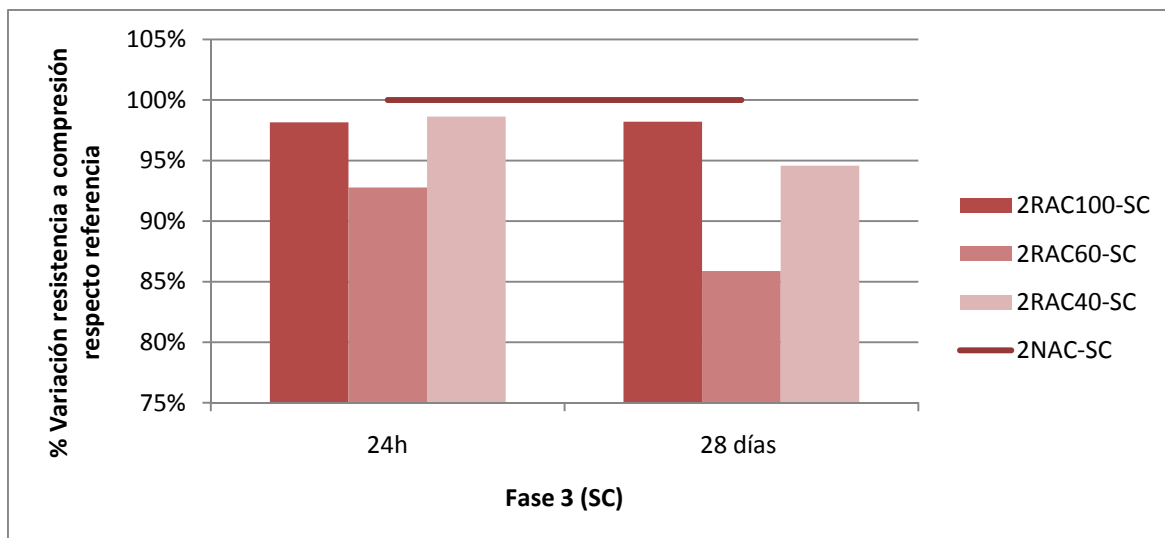


Figura 5:5 Incremento resistencia a compresión respecto un tiempo determinado.

Todos los hormigones evolucionan de forma parecida respecto el hormigón de referencia, siendo este incremento menor. A los 28 días estos valores se acercan al hormigón de referencia, pero debido al aumento de la relación a/c y el aumento del tamaño máximo del árido, sus resistencias se ven notablemente reducidas.

Si estudiamos en conjunto cada una de las fases, podemos determinar que el hecho de aumentar la relación de a/c, ha provocado una disminución general de las resistencias de los hormigones estudiados durante la etapa de 24 horas, 28 y 90 días. El hecho de incrementar el tamaño máximo de árido en la fase 3, provoco una disminución de las resistencias, exceptuando para el hormigón 1RAC40-SC, donde durante las primeras 24h, esta resistencia se vio ligeramente mejorada respecto los resultados en la fase 1.

5.2.2 Resistencia a tracción indirecta

Se utilizaron probetas cilíndricas 20x10cm y se ensayaron para la edad de 28 días. Los valores obtenidos en la *tabla 5:4* son el promedio de las probetas ensayadas.

Tabla 5:4 Resistencia a tracción indirecta (SC), fase 1, 2 y 3, 28 días.

Hormigón	28 días (Mpa)	Hormigón	28 días (Mpa)	Hormigón	28 días (Mpa)
NAC-SC	4,57	1NAC-SC	2NAC-SC	3,89	3,77
RAC100-SC	4,32	1RAC100-SC	2RAC100-SC	3,37	4,15
RAC60-SC	4,23	1RAC60-SC	2RAC60-SC	3,36	4,34
RAC40-SC	3,66	1RAC40-SC	2RAC40-SC	3,43	3,72

Fase 1

El hormigón convencional alcanza unas resistencias a tracción mayores que el resto de hormigones reciclados. El peor valor lo obtuvo el RAC40-SC con un 19,91% menor respecto al hormigón de referencia.

Fase 2

El 1RAC100-SC alcanza unas resistencias a tracción mayores que el resto de hormigones, con un 9% más que el de referencia. El 1RAC40 obtuvo la menor resistencia a tracción, siendo esta un 18,18% menor que la del hormigón convencional.

Fase 3

El hormigón convencional alcanza unas resistencias a tracción mayores que el resto de hormigones reciclados. El peor valor lo obtuvo el 2RAC60-SC con un 19,91% menor respecto al hormigón de referencia.

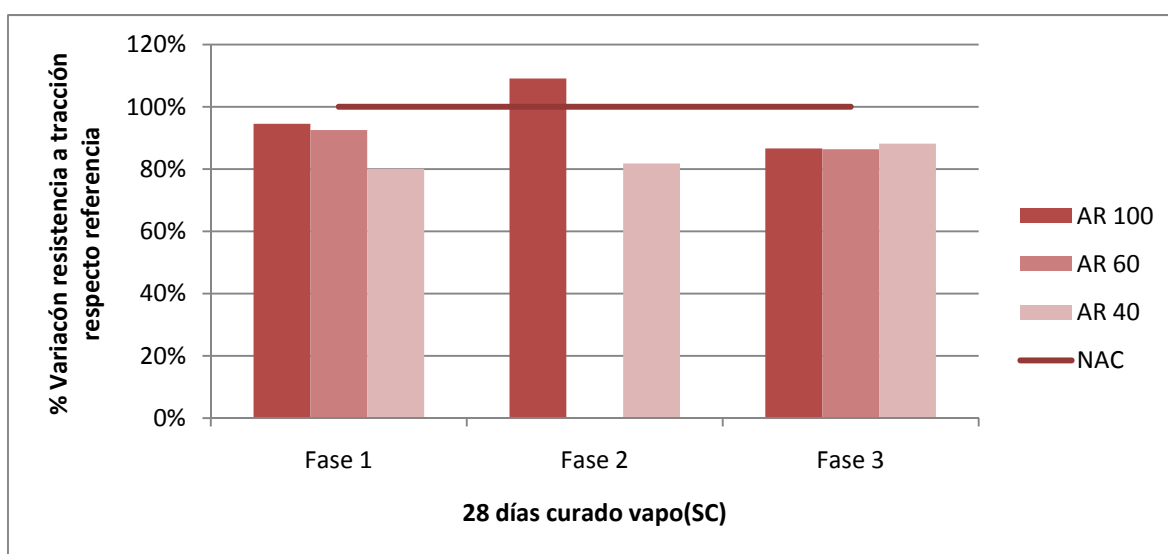


Figura 5:6 Variación resistencia a tracción respecto al hormigón convencional de la fase 1.

Si vemos la evolución de la resistencia a tracción indirecta a los 28 días, al aumentar la relación a/c en la mezcla, los hormigones pierden resistencia exceptuando el 1RAC100-SC. Después, al aumentar el tamaño máximo del árido en la fase 3, hay una pérdida significativa en el hormigón con árido de 100 MPa, sin embargo el hormigón de referencia se ve poco afectado y el 2RAC40-SC gana una mayor resistencia respecto al de la fase 2.

5.2.3 Módulo de elasticidad

El modulo se obtuvo a la edad de 28 días mediante el ensayo de probetas cilíndricas de 20x10cm. En la *tabla 5:5* se muestran los resultados

Tabla 5:5 Módulo de elasticidad (GPa), fase 1, 2 y 3, 28 días (SC).

Hormigón	28 días (GPa)	Hormigón	28 días (GPa)	Hormigón	28 días (GPa)
NAC-SC	45,77	1NAC-SC	38,81	2NAC-SC	39,12
RAC100-SC	46,27	1RAC100-SC	36,48	2RAC100-SC	34,95
RAC60-SC	38,49	1RAC60-SC	-	2RAC60-SC	28,85
RAC40-SC	38,25	1RAC40-SC	32,03	2RAC40-SC	24,48

Debido a la porosidad de los áridos reciclados y que estos son más propensos a deformarse, podemos observar cómo se produce una disminución en el módulo [4], siendo el hormigón de referencia en las 3 fases el que mayor valor a obtenido, exceptuando la fase 1, donde el RAC100-SC tiene una mayor resistencia que el hormigón de referencia.

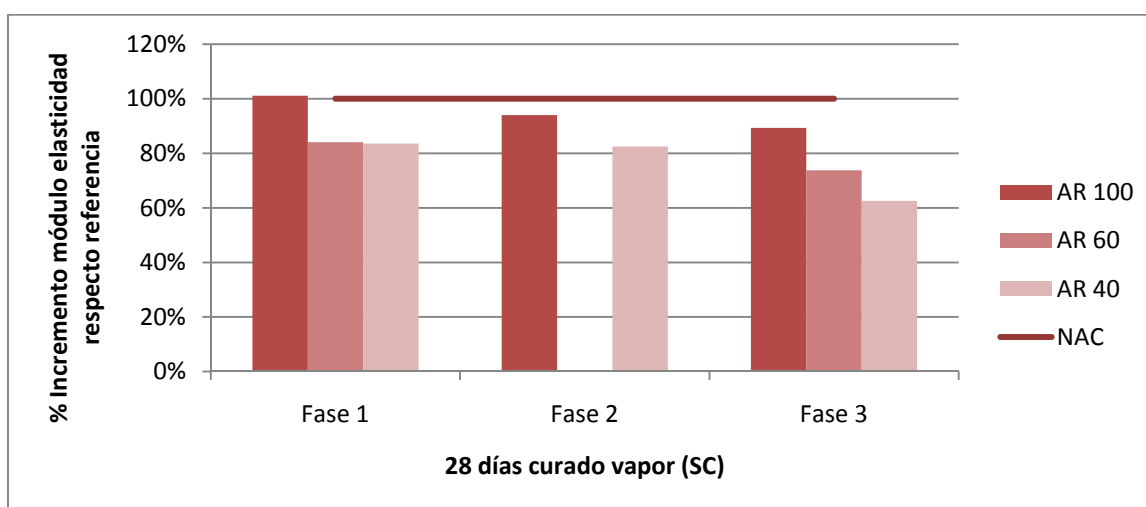


Figura 5:7 Variación del módulo elasticidad respecto al hormigón de referencia.

También podemos observar como para áridos de peor calidad, su módulo elástico es menor y, a medida que aumentamos la relación a/c y el tamaño máximo del árido, el modulo elástico en cada uno de los hormigones disminuye. Para la fase 1, el modulo obtenido en los áridos de 60 y 40 MPa hace suponer que para áridos de baja calidad, la diferencia de pérdidas de módulo de elasticidad no es muy elevada ya que los valores obtenidos en las muestras son similares.

5.3 Ensayos físicos

5.3.1 Densidad, absorción y poros accesibles

Estas características se determinaron a los 28 días de edad en probetas cubicas de 10x10cm. Los resultados se muestran en las *tablas 5:6, 5:7, 5:8*.

Fase 1

Tabla 5:6 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 1 (SC).

Hormigón	Densidad seca (kg/m3)	Absorción (%)	Volumen de poros (%)
NAC-SC	2,44	2,71	6,6
RAC100-SC	2,37	3,39	8,04
RAC60-SC	2,34	3,69	8,63
RAC40-SC	2,33	3,66	8,52

Debido a que los áridos reciclados tienen una porosidad mayor, la densidad del hormigón reciclado es menor que el de referencia y estos tienen una mayor absorción.

Fase 2

Tabla 5:7 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 2 (SC).

Hormigón	Densidad seca (kg/m3)	Absorción (%)	Volumen de poros (%)
1NAC-SC	2,39	3,34	7,94
1RAC100-SC	2,3	4,29	9,87
1RAC40-SC	2,23	5,34	11,91

Como en el anterior caso, los áridos reciclados tienen una menor densidad seca debido a su porosidad, siendo el 1RAC40-SC el que tiene un valor menor, ya que es un material de baja calidad y muy poroso en comparación con un árido de 100 MPa.

Fase 3

Tabla 5:8 Valores de densidad, absorción y volumen de poros a los 28 días, fase 3 (SC).

Hormigón	Densidad seca (kg/m3)	Absorción (%)	Volumen de poros (%)
2NAC-SC	2,33	4,01	9,37
2RAC100-SC	2,27	4,65	10,52
2RAC60-SC	2,21	6,2	13,64
2RAC40-SC	2,19	6,25	13,67

La misma situación que en la fase 1 y 2 del estudio.

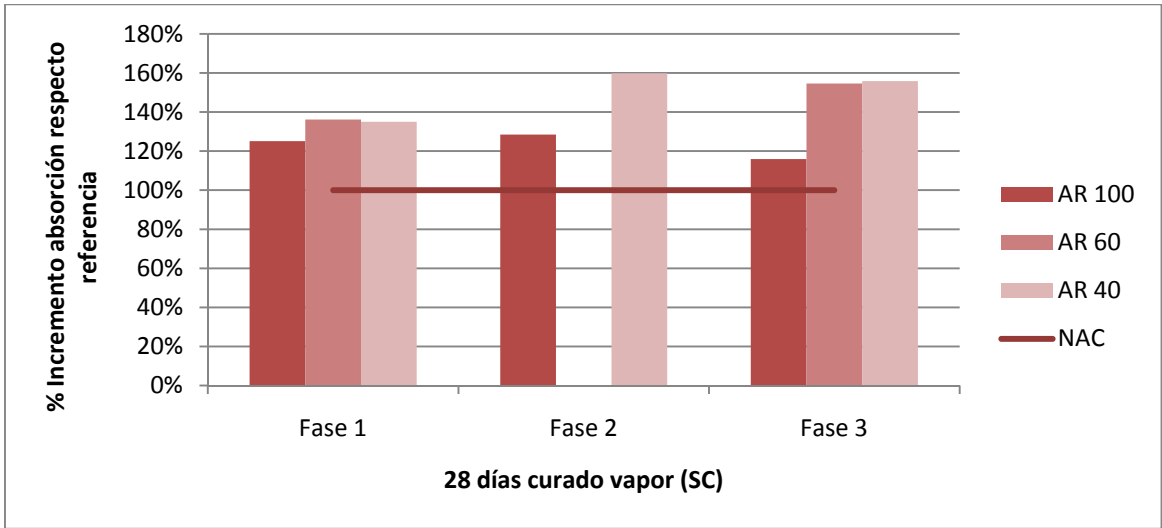


Figura 5:8 Variación de la absorción respecto al hormigón de referencia.

Analizando las 3 fases podemos constatar que a medida que hemos aumentado la cantidad de agua en la dosificación (relación agua/cemento), el volumen de poros y la absorción han aumentado en cada una de las muestras y la densidad seca ha disminuido. Al aumentar el tamaño máximo del árido ha ocurrido exactamente lo mismo. Por lo tanto, los hormigones con peor calidad de áridos sufrieron los peores efectos debido a que estos son más porosos.

5.4 Ensayos del hormigón endurecido (NC), Durabilidad

En el siguiente apartado se hará un estudio de los valores obtenidos por los ensayos de densidad, succión capilar, UPC y resistencia a la penetración de cloruros.

5.4.1 Succión capilar

Los coeficientes de succión determinados durante las 6 primeras horas para cada tipología de hormigón se encuentran en la *tabla 5:9* y las probetas fueron ensayadas a los 28 días.

Fase 1

Tabla 5:9 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 1, edad de 28 días (SC).

Hormigón	Coeficiente de succión (mm/min ^{0.5})
NAC-SC	0,012
RAC100-SC	0,011
RAC60-SC	0,015
RAC40-SC	0,015

La única dosificación que presento un coeficiente de succión menor al hormigón de referencia es el RAC100-SC y se debe a que tiene una mejor interfase (ITZ). El resto de hormigones, al tener una mayor absorción, obtuvieron un coeficiente de succión mayor al de referencia. Influye mucho la calidad del árido, ya que a peor calidad mayor será la succión experimentada por el hormigón.

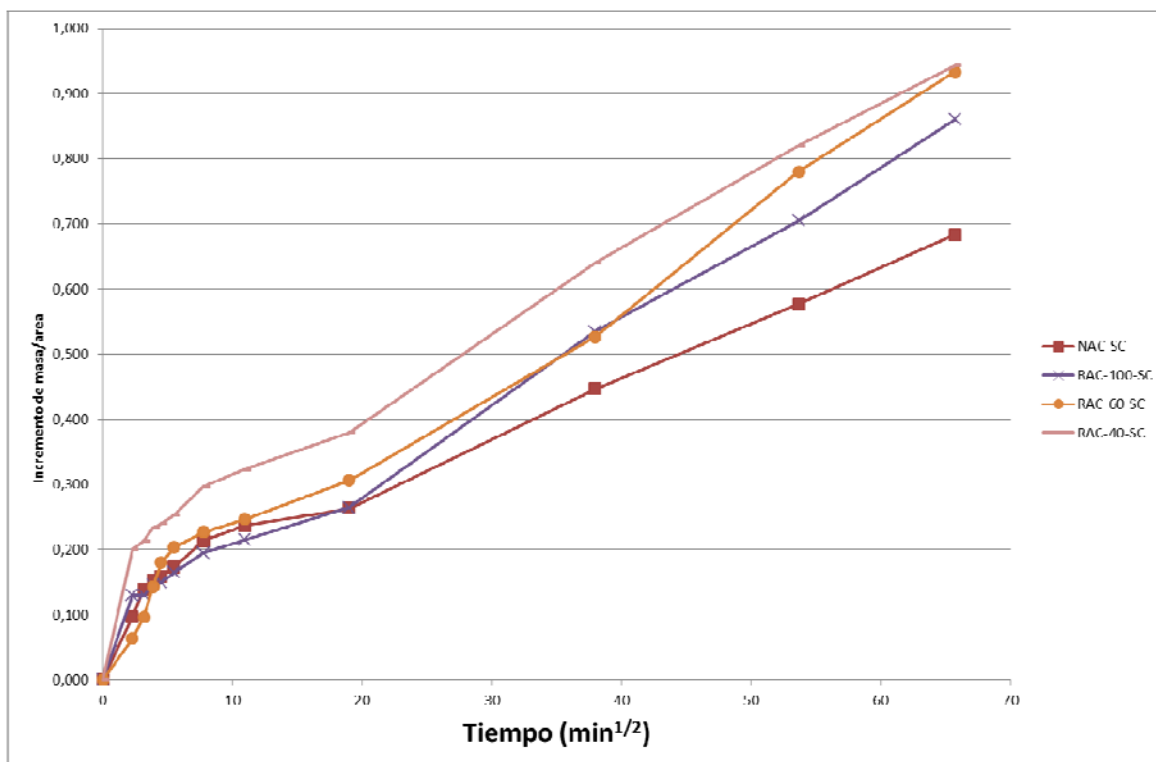


Figura 5:9 Absorción capilar, para 28 días.

Se puede apreciar que en las primeras horas la absorción creció de manera lineal hasta que poco a poco se fue estabilizando. El hormigón que presento una mayor absorción es el RAC40-SC seguido muy de cerca por el RAC60-SC. Esto es debido a la baja calidad del árido respecto al de 100 MPa.

Fase 2

Tabla 5:10 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 2, edad de 28 días (SC).

Hormigón	Coeficiente de succión (mm/min ^{0.5})
1NAC-SC	0,019
1RAC100-SC	0,022
1RAC40-SC	0,034

Todas las dosificaciones tienen un coeficiente de succión superior al de referencia debido al aumento de la relación a/c en la mezcla.

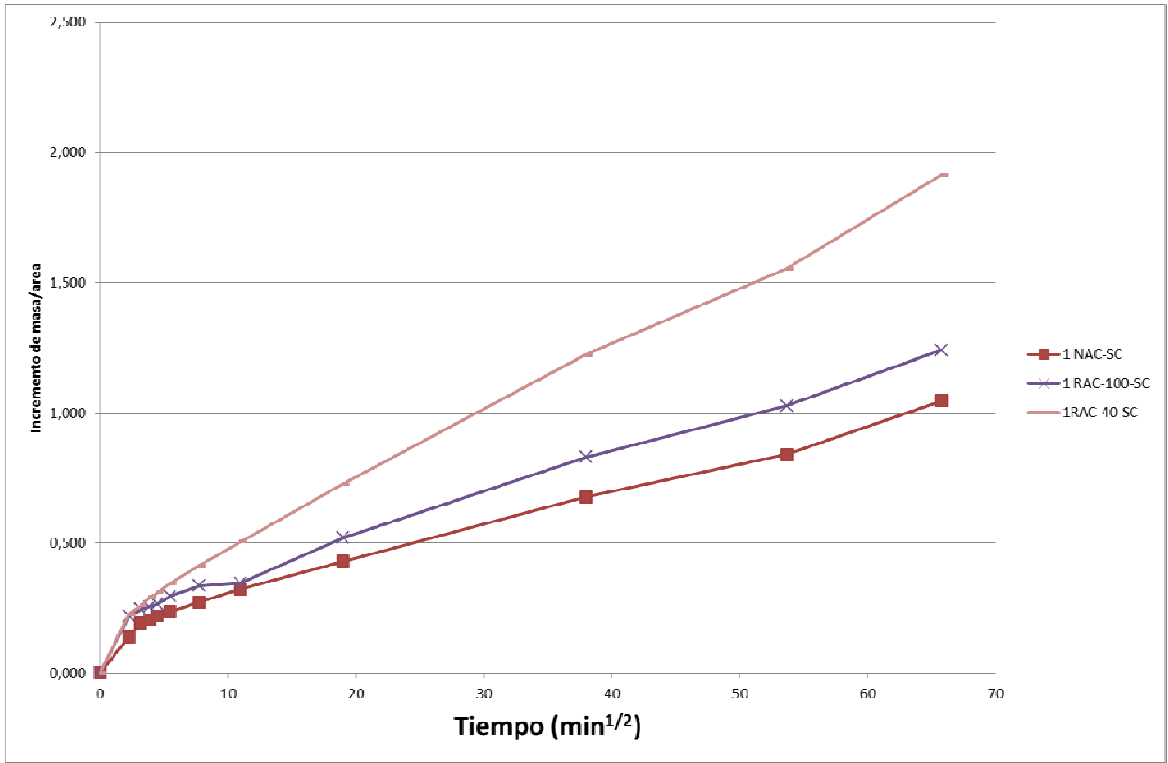


Figura 5:10 Absorción capilar, para 28 días.

Las diferentes tipologías durante las primeras horas tienen un comportamiento similar, pero a medida que transcurre el tiempo, los valores obtenidos por el 1RAC40-SC quedan muy por encima del resto debido a que la calidad de su árido es peor y que hay más agua en la dosificación.

Fase 3

Tabla 5:11 Coeficiente de succión a las 6 horas, fase 3, edad de 28 días (SC).

Hormigón	Coeficiente de succión (mm/min ^{0.5})
2NAC-SC	0,021
2RAC100-SC	0,020
2RAC60-SC	0,028
2RAC40-SC	0,029

Los resultados obtenidos para el 2RAC100 son similares al hormigón convencional, sin embargo el resto tienen una mayor capacidad de absorción debido a la peor calidad del árido reciclado.

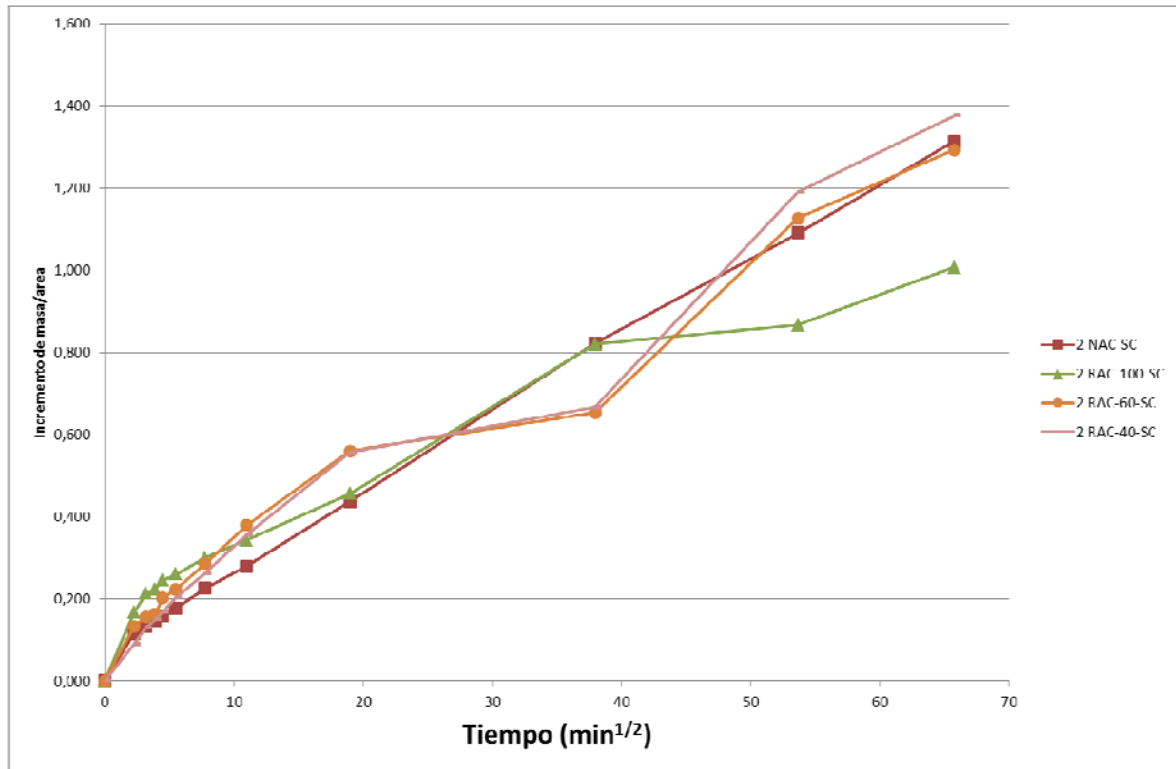


Figura 5:11 Absorción capilar, para 28 días.

En la *figura 5:11* volvemos a ver un crecimiento lineal donde al final el hormigón con mayor absorción es el 2RAC40-SC debido a que es el de peor calidad que el resto, y el 2RAC100-SC es el que obtiene un menor valor respecto al resto de hormigones con árido reciclado y al de referencia.

Si nos fijamos en las 3 fases, se puede llegar a la conclusión de que a medida que aumentamos la cantidad de agua (relación agua/cemento) obtenemos una mayor absorción en todas las tipologías de hormigón, pero en el caso de aumentar el tamaño del árido, la absorción capilar para los hormigones con árido reciclado de peor calidad disminuye.

5.4.2 UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

A la edad de 28 días, una vez se han saturado las probetas cubicas de 10x10cm, se realiza el ensayo de UPV descrito anteriormente. En la *tabla 5:12* mostramos los resultados obtenidos.

Fase 1, 2 y 3

Tabla 5:12 Resultados UPV, fase 1,2 y 3, edad de 28 días (SC).

Hormigón	Velocidad (m/s) 28d	Hormigón	Velocidad (m/s) 28d	Hormigón	Velocidad (m/s) 28d
NAC-SC	5192	1NAC-SC	4893	2NAC-SC	5010
RAC100-SC	4968	1RAC100-SC	4567	2RAC100-SC	4696
RAC60-SC	4610	1RAC60-SC	-	2RAC60-SC	4382
RAC40-SC	4654	1RAC40-SC	4343	2RAC40-SC	4304

Observamos que en la 1 y 2 fase todos los hormigones tienen una excelente calidad si lo comparamos con la tabla propuesta por Whitehurts, exceptuando el 1RAC40-SC en la fase 2, donde su puntuación sería de buena. Sin embargo, en la fase 3, solo el hormigón de referencia y el que tiene el árido reciclado de mayor calidad (2RAC100-SC) mantienen la misma calidad respecto las anteriores fases. El resto pasa de excelente a una buena calidad con unos valores muy similares entre ellos.

El hecho de aumentar la relación a/c y el máximo tamaño de árido utilizado nos permite observar como en cada fase, la calidad del hormigón va disminuyendo a medida que alteramos estos parámetros.

5.4.3 Resistencia a la penetración de los iones cloruros

El ensayo se realiza a la edad de 28 y 90 días, en la *tabla 5:13* se muestran los resultados obtenidos durante el estudio.

Fase 1

Tabla 5:13 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 1, 28 y 90 días (SC).

Hormigón	Total de carga 28d (Coulombs)	Hormigón	Total de carga 90d (Coulombs)
NAC-SC	1935,000	NAC-SC	988,65
RAC100-SC	1832,400	RAC100-SC	2554,65
RAC60-SC	2584,350	RAC60-SC	2056,5
RAC40-SC	3251,700	RAC40-SC	1596,6

El rango de valores del ensayo se muestra en la *tabla 3:8* del apartado de durabilidad donde quedan definidos los valores del riesgo de la penetración de cloruros.

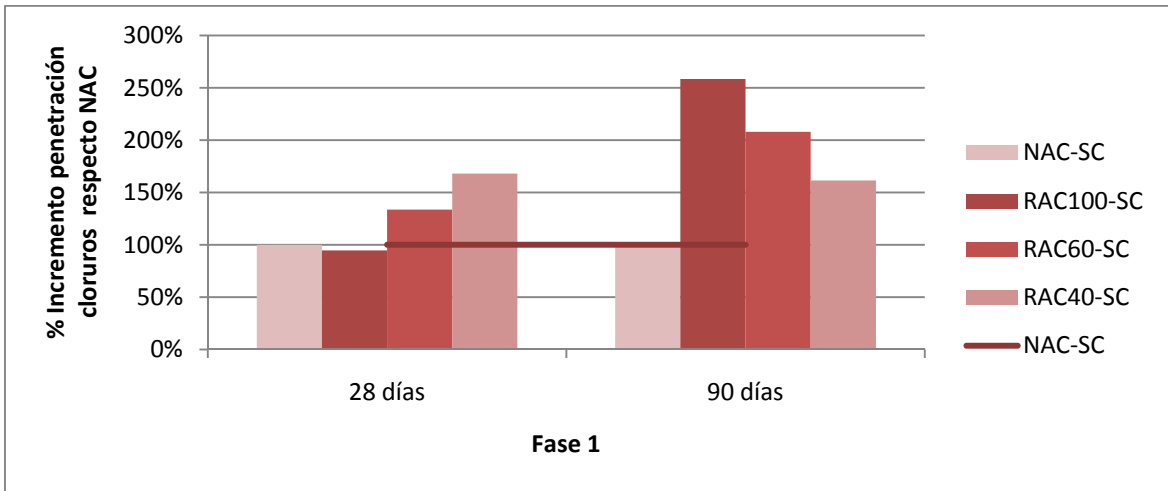


Figura 5:12 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para las edades de 28 y 90 días.

Se observa que para una edad a 28 días, el hormigón con mayor resistencia a un ataque por cloruros es el RAC100-SC seguido por el hormigón de referencia. El RAC40-SC es el que se ve más afectado por un posible ataque.

A los 90 días, las resistencias contra los ataques de cloruros aumentan en todos los hormigones, siendo el NAC el más resistente debido a que su composición la forman áridos naturales, y el hormigón con un árido reciclado de peor calidad es el más vulnerable.

Fase 2

Tabla 5:14 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 2, 28 y 90 días (SC).

Hormigón	Total de carga 28d (Coulombs)	Hormigón	Total de carga 28d (Coulombs)
1NAC-SC	3352,1	1NAC-SC	2102,9
1RAC100-SC	4487	1RAC100-SC	3172,5
1RAC60-SC	-	1RAC60-SC	-
1RAC40-SC	6630,3	1RAC40-SC	5539,5

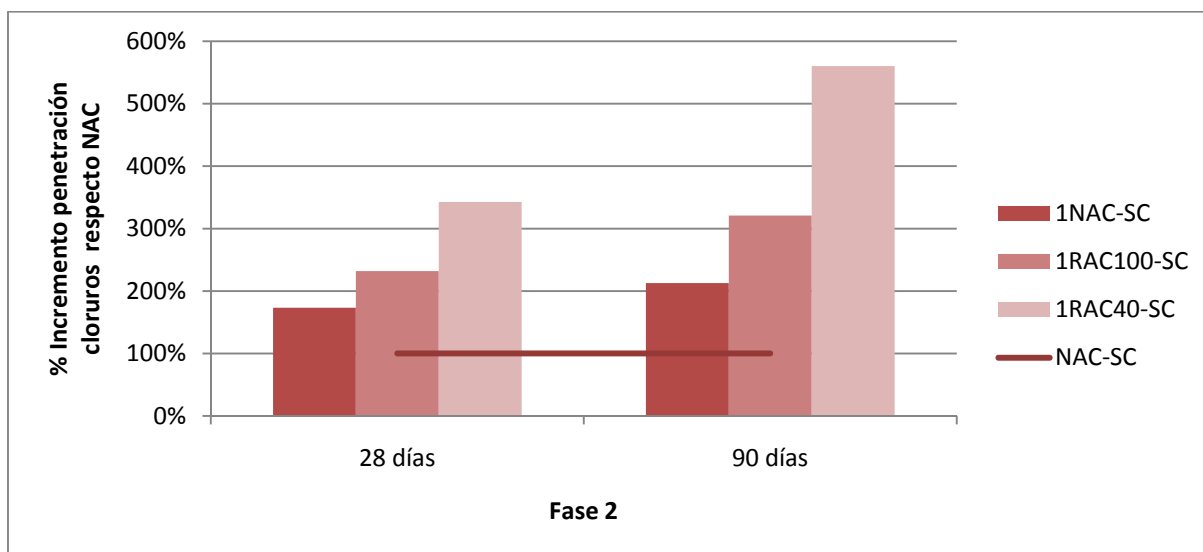


Figura 5:13 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para las edades de 28 y 90 días.

A los 28 días, el hormigón de referencia es el más resistente a los ataques, en cambio el 1RAC40-SC, su valor es bastante mayor respecto al resto debido a la mala calidad de su árido reciclado.

Transcurridos 90 días, el hormigón de referencia y 1RAC100-sc aumentan sus resistencias contra los ataques a cloruros, siendo el hormigón convencional el más resistente. Sin embargo, el 1RAC40-SC sigue con un valor muy elevado.

Fase 3

Tabla 5:15 Valores de la carga eléctrica para los hormigones fabricados, fase 1, 28 días (SC).

Hormigón	Total de carga 28d (Coulombs)
1NAC	3265,2
1RAC100	3624,3
1RAC60	5388,3
1RAC40	8278,7

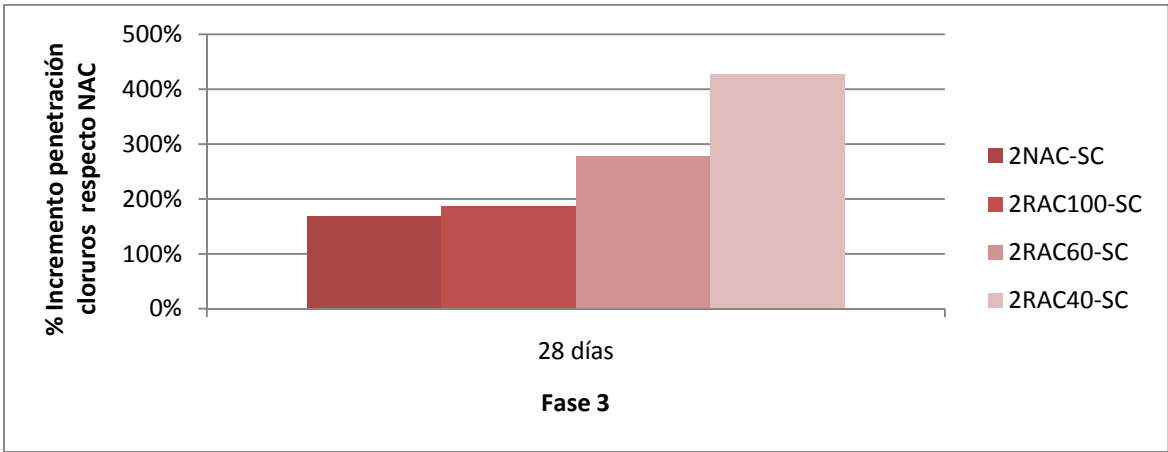


Figura 5:14 Incremento de la penetración de cloruros respecto al hormigón de referencia, para la edad de 28 días.

A los 28 días, el hormigón más resistente a los ataques es el de referencia, aunque el 2RAC100-SC tiene un valor parecido. A medida que la calidad del árido disminuye, podemos ver en la gráfica como su resistencia es menor.

Si observamos detalladamente las 3 fases, podemos llegar a la conclusión de que a medida que aumentamos la relación a/c, los hormigones pierden resistencia contra los ataques de cloruros debido a que estos ganan una mayor porosidad. Al aumentar el tamaño máximo del árido, todos los hormigones pierden resistencia exceptuando el que tiene el árido de mejor calidad de 100 MPa.

6 Comparación NC-SC

6.1 Introducción

En el siguiente apartado se comparan los resultados obtenidos por los diferentes tipos de curado (NC-SC) utilizados durante toda la fase experimental. La discusión se centra en la resistencia a compresión para las propiedades mecánicas y la resistencia a la penetración de los iones cloruros, en el caso de la durabilidad. Esto es debido a que son los dos ensayos más determinantes para caracterizar cómo se comporta el hormigón.

6.2 Propiedades mecánicas

6.2.1 Resistencia a compresión

En las primeras 24 horas, todos los hormigones que fueron curados al vapor obtuvieron una resistencia mayor a sus respectivos con curado normal. Dentro de los hormigones con curado al vapor, todos los RAC de cada una de las fases de estudio llegaron a obtener una resistencia mayor que los hormigones de referencia con curado normal en cada una de las fases de estudio.

A los 28 días, los resultados obtenidos para los hormigones con curado al vapor fueron inferiores a los de curado normal. Para los áridos reciclados de peor calidad (60, 40 MPa), estos obtuvieron unas resistencias menores respecto al hormigón de referencia en cada una de sus fases, independientemente del tipo de curado. Sin embargo, el hormigón con un árido reciclado de 100 MPa, para la fase 1 alcanza una resistencia mayor al hormigón de referencia y, para el resto de fases, obtuvo valores similares a este sin importar el tipo de curado.

Los hormigones estudiados a la edad de 90 días, todos los hormigones con árido reciclado obtuvieron resistencias mayores al hormigón de referencia en cada una de sus fases y en cada tipo de curado, exceptuando el hormigón de peor calidad (40 MPa), su resistencia fue menor al hormigón convencional en la fase 2 y 3. Debido a que no tenemos resultados para el árido de 60 MPa en la fase 2 y los resultados de la resistencia a compresión se obtendrán una vez entregado este documento a la escuela, no podemos ver la evolución de la resistencia a compresión a medida que avanzan las fases de estudio, así que no sabemos si su comportamiento se acercara más al hormigón de mejor calidad (100 MPa) o sin embargo se asemejara al de peor.

6.2.2 Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta se ve afectada al aplicar el método de curado al vapor en el hormigón, disminuyendo su valor en comparación con los resultados obtenidos por curado normal.

En el caso de curado normal, el hecho de aumentar la relación agua/cemento en la fase 2 y el tamaño máximo de árido en la fase 3, provoca una pérdida de resistencias en general, exceptuando en el caso del hormigón reciclado de 40 MPa, que solo se ve afectado al modificar el tamaño máximo del árido y apenas nota cambios al aumentar la relación agua/cemento en la fase 2.

En el caso de curado al vapor, todas las resistencias disminuyen al modificar las 2 propiedades anteriores, excepto para el hormigón con árido de mejor calidad (100 MPa), que al aumentar la relación agua/cemento en la fase 2, la variación de resistencias es prácticamente nula.

6.2.3 Módulo de elasticidad

En general, los hormigones que tuvieron un curado normal durante el ensayo experimental obtuvieron valores mayores de modulo respecto a los hormigones con curado al vapor, exceptuando el RAC100-SC en la fase 1 y el 1NAC-SC en la fase 2, que obtuvieron valores mayores que sus respectivos con curado normal.

Para curado normal el hecho de utilizar hormigones con áridos reciclados hizo disminuir el modulo en cada una de las fases de estudio. Al aumentar la relación agua/cemento en la fase 2 y el tamaño máximo de árido en la fase 3, provoco una bajada de las resistencias en los hormigones, exceptuando el 2RAC100 y el 2NAC, que al aumentar el tamaño máximo del árido, sus valores de modulo crecieron respecto a los obtenidos en la fase 2.

Para curado a vapor, el uso de áridos reciclados y la variación de agua/cemento junto con el tamaño máximo del árido disminuyeron los valores del módulo en cada uno de los hormigones para cada fase de estudio. En la fase 1, el hormigón con árido reciclado de mayor calidad (100 MPa) obtuvo un resultado mejor respecto al de referencia.

6.3 Propiedades físicas

6.3.1 Densidad, absorción y poros accesibles

El tipo de curado utilizado en el hormigón no influye en estas propiedades. Los valores de la densidad son menores para los hormigones reciclados debido a que estos son más porosos y tienen una capacidad de absorción mayor comparados con los hormigones convencionales.

6.4 Durabilidad

6.4.1 Succión capilar

Para cada una de las fases del estudio experimental realizado, los resultados obtenidos mediante el método de curado al vapor y curado normal son similares. El hormigón de referencia conjuntamente con el hormigón con árido reciclado de mayor calidad obtuvieron resultados muy parecidos, y los hormigones de peor calidad fueron los que obtuvieron los peores resultados. El hecho de aumentar la relación agua/cemento en la fase 2 y el tamaño máximo del árido en la fase 3 provoca un aumento de la succión en todos los hormigones.

6.4.2 UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

Los resultados obtenidos en el ensayo UPV fueron similares independientemente del tipo de curado que se utilizó en el hormigón. Al modificar la relación agua/cemento en la fase 2 y el tamaño máximo del árido en la fase 3 provocó una disminución de la calidad, exceptuando el caso del hormigón 100MPa y el de referencia en la fase 3, que al aumentar el tamaño máximo del árido, su calidad mejora respecto los resultados obtenidos en la fase 2.

6.4.3 Resistencia a la penetración por iones cloruros

Los resultados obtenidos a la edad de 28 días determinaron que para los dos tipos de curado, los hormigones con árido reciclado obtuvieron una menor resistencia a los ataques. Si modificamos la relación agua/cemento en la fase 2 y el tamaño máximo del árido en la fase 3, podemos observar como las resistencias en cada uno de los hormigones disminuye bastante respecto los valores obtenidos en la fase 1. El hormigón con árido de 40 MPa, al ser este el de peor calidad, su resistencia es muy baja en comparación con el resto de tipologías de hormigón. En la fase 1, el hormigón con árido reciclado de mejor calidad (100MPa) obtiene una resistencia mayor respecto al hormigón de referencia, para el caso de curado al vapor y curado normal.

A 90 días, sucede exactamente lo mismo que a la edad de 28 días, solo que los hormigones ganan mayores resistencias respecto a los ataques de los iones cloruros, sobretudo el hormigón convencional en la fase 1 aumenta mucho su resistencia en comparación con el valor obtenido a los 28 días. Para los hormigones con curado a vapor, estos obtienen una menor ganancia de resistencias en comparación al convencional y al aumentar la relación agua/cemento y tamaño máximo de los áridos, la pérdida de resistencias es mayor para los hormigones con curado al vapor que el normal.

7 Conclusiones

7.1 Introducción

En este apartado, a partir de los resultados obtenidos durante la fase experimental, se determinarán el comportamiento de los hormigones reciclados respecto al convencional dependiendo de una serie de variables (tipo de curado, relación agua/cemento y tamaño máximo del árido), y se obtendrán una serie de conclusiones.

7.2 Conclusiones generales

Al estudiar el comportamiento de los áridos reciclados en su uso para un hormigón estructural, se ha podido demostrar que las resistencias obtenidas en las diferentes fases durante el estudio corresponden a hormigones de alta resistencia.

Al aplicar el método de curado al vapor permite durante las primeras 24 horas la obtención de resistencias elevadas a corto plazo tanto para los hormigones con áridos reciclados como para el convencional. Sin embargo, para hormigones con 28 y 90 días de edad, las resistencias superiores se obtuvieron en el hormigón convencional. Podría decirse, que para adquirir mejores prestaciones mecánicas a largo plazo, se debería utilizar el método de curado normal.

El hecho de dividir el trabajo en 3 fases nos permitió demostrar que la relación agua/cemento tiene una gran influencia en las propiedades resistentes y de durabilidad del hormigón reciclado, donde los hormigones con una relación agua/cemento menor fueron los que obtuvieron mejores resultados. En la fase 3 se pudo constatar como el hecho de aumentar el tamaño máximo del árido produjo una disminución de las propiedades del hormigón y obtuvo peores valores en lo que respecta a la durabilidad de este.

Para los ensayos de succión capilar y UPV, el uso de curado al vapor no tuvo un impacto significativo en la durabilidad del hormigón reciclado y los resultados obtenidos para cada tipo de curado fueron similares. Sin embargo, en el ensayo de penetración por los iones de cloruro, el curado a vapor afectó a las muestras, disminuyendo su resistencia a los ataques a cloruros.

La sustitución del 100% de los áridos naturales por reciclados ha supuesto una disminución de la durabilidad del hormigón reciclado respecto al convencional, obteniendo una menor resistencia al ataque de cloruros, y por lo tanto, un aumento del riesgo de corrosión.

En la resistencia a compresión, hemos observado que durante la fase 1 y con el uso del hormigón reciclado de peor calidad (40 MPa) las resistencias obtenidas comparándolas con el hormigón de referencia son similares, donde con un curado normal los resultados obtenidos a 90 días para el RAC40 fueron ligeramente inferiores al de referencia y para el curado a vapor las resistencias para cada uno de ellos fueron prácticamente las mismas.

Finalmente, se puede determinar que utilizar hormigones con una sustitución del 100% de áridos natural por áridos reciclados es factible ya que según los resultados obtenidos en este estudio, se obtienen características similares respecto al hormigón convencional.

7.3 Futuras líneas de investigación

Ampliando el estudio añadiendo nuevos tipos de ensayo tales como ciclos hielo-deshielo, resistencia al fuego y ensayos para determinar si se produciría la reacción álcali-árido. También es necesario realizar ensayos de fatiga, ya que son esenciales para verificar el comportamiento del hormigón y que este pueda ser empleado estructuralmente.

Otra vía sería estudiar el comportamiento del árido reciclado con un hormigón armado, ver si se ve alterada la adherencia del hormigón con el acero y comprobar los posibles sistemas de deterioro que puedan llegarse a producir.

Podría estudiarse que efectos produce en el hormigón el uso de varios tipos de áridos reciclados de diferente calidad y proporción en un mismo espécimen, y como con la variación de estos porcentajes se modifican las propiedades obtenidas del hormigón reciclado.

Sería interesante hacer un estudio económico de lo que cuesta tratar los residuos para obtener el árido reciclado y comparar este con los precios del árido natural. Es importante conocer estos costes, ya que aunque estos sean superiores a lo que cuesta la obtención del natural, es muy importante el hecho de reciclar y dar un uso a un material que perjudica el medioambiente.

Finalmente, sería interesante hacer una prueba piloto para poder determinar cómo actúa el hormigón reciclado de altas resistencias frente a condiciones normales de servicio, intentando buscar posibles debilidades que se hayan pasado por alto en los ensayos y poder ver mejor su comportamiento.

8 Bibliografía

- [1] D. Matias, J. de Brito, A. Rosa, D. Pedro, "Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers", *Construction and Building Materials*, vol 44, pp. 101-109, 2013.
- [2] "Cedex-materiales" [Online], <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/>
- [3] M. Etxeberria, E. Vázquez, a. Marí, and M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", *Cem. Concr. Res.*, vol 37, no 5, pp. 735–742, 2007.
- [4] A. Abbas, G. Fathifazl, O. B. Isgor, A. G. Razaqpur, B. Fournier, and S. Foo, "Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method", *Cem. Concr. Compos.*, vol 31, no 8, pp. 555–563, 2009.
- [5] F. Agrela, P. Alaejos, and M. S. De Juan, "Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste". Elsevier, 2013, pp. 304–329.
- [6] K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate", *Build. Environ.*, vol 42, no 1, pp. 407–415, 2007.
- [7] A. Konin, D. Mangoua, "Influence of Cement Content on Recycled Aggregates Concrete Properties", vol 5, no 1, pp. 23-31, 2011.
- [8] L. Butler, J. S. West, and S. L. Tighe, "The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement", *Cem. Concr. Res.*, vol 41, no 10, pp. 1037–1049, 2011.
- [9] Q. Liu, J. Xiao, and Z. Sun, "Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete", *Cem. Concr. Res.*, vol 41, no. 10, pp. 1050–1057, 2011.
- [10] M. Etxeberria, A. Gonzalez, "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, vol 52, pp. 227-235, 2014.
- [11] C. Hoffmann, S. Schubert, A. Leemann, M. Motavalli. "Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material", *Construction and Building Materials*, vol 35, pp. 701–9, 2012.
- [12] D. Pedro, J. Brito, L. Evangelista, "Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete", *Construction and Building Materials*, vol 71, pp. 141-151, 2014.
- [13] A. Padmini, K. Ramamurthy, M. Mathews, "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, vol 23, pp. 829-836, 2009.
- [14] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, "Influence of the amount of

recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties”, *Construction and Building Materials*, vol 26, pp. 565–573, 2011.

[15] R. Dhir, M. Etxeberria, K. Paine, N. Ho, V. Tam, J. Brito, C. Poon, “USE OF RECYCLED AND SECONDARY AGGREGATES IN CONCRETE: AN OVERVIEW”.

[16] GONÇALVES, P. “Concrete with recycled aggregates. Commented analysis of existing legislation.” (in Portuguese), Civil Engineering Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Lisbon, 2007.

[17] LENG, F., FENG, N., LU, X., “An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete”. *Cement and Concrete Research*. 30(6), 989-992.

[18] S.-C. Kou, C.-S. Poon, and M. Etxeberria, “Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol 33, no. 2, pp. 286–291, 2011.

[19] a. Domingo-Cabo, C. Lázaro, F. López-Gayarre, M. a. Serrano-López, P. Serna, and J. O. Castaño-Tabares, “Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, vol 23, no 7, pp. 2545–2553, 2009.

[20] DHIR, R K, PAINE, K A. Demonstration project utilising coarse recycled aggregates. Concrete Technology Unit, Report CTU/2403, 2003, 109pp

[21] FRAAIJ, A L A, PIETERSEN, H S, DE VIREOS, J. Performance of concrete with recycled aggregates. *Sustainable Concrete Construction*, Eds. RK Dhir, T D Dyer and Halliday J., Thomas Telford, 2002, pp 187-198

[22] M. Tuyan, A. Mardani-Aghabaglou, and K. Ramyar, “Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate”, *Mater. Des.*, vol 53, pp. 983–991, 2014.

[23] D. Cree, M. Green, A. Noumowé, “Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review”, *Construction and Building Materials*, vol 45, pp.208-223, 2013

[24] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, “Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC”, *Cement & concrete composites*, vol 24, pp. 269-279, 2002.

[25] M. Limbachiya, T. Leelawat, R. Dhir, “Use of recycled concrete aggregate in high-strength Concrete”, vol 33, pp. 574-580, 2000.

[26] Kheder GF, Al-Windaw SA, “Variation in mechanical properties of natural and recycled aggregate concrete as related to the strength of their binding mortar”, *Mater Struct*, vol 38, pp. 701–9, 2005

[27] Al-Rawi R.S., “Effects of cement composition and w/c ratio strength of accelerated cured concrete”, *Cem. Concr. Res.*, vol 7, pp. 313–322, 1977.

- [28] M. Gesoglu, E. Güneyisi, B. Ali, K. Mermerdas, "Strength and transport properties of steam cured and water cured lightweight aggregate concretes", vol 49, pp.417-424, 2013.
- [29] T. Erdem, L. Turanli, T. Erdogan, "Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete", vol 33, pp.741-745, 2003.
- [30] S. Kou, C. Poon, D. Chan, "PROPERTIES OF STEAM CURED RECYCLED AGGREGATE FLY ASH CONCRETE", Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.
- [31] A. Ramezaniapour, M. Khazali, P. Vosoughi, "Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete", Construction and Building Materials, vol 49, pp. 807-813, 2013.
- [32] W. EA., "Soniscope test concrete structures," J Am Concr Inst, no. 47, pp. 443-4.
- [33] M. Etxeberria, A. Gonzalez, "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete", Construction and Building Materials, vol 52, pp. 227-235, 2014